



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Departamento de Engenharia Mecânica

DEM/POLI/UFRJ



ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DE UM CICLO BRAYTON COM INJEÇÃO DE VAPOR

Renata Cardoso Bezerra

PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRA MECÂNICA.

Aprovado por:

Prof. Marcelo José Colaço

Prof. Albino José Kalab Leiroz

Prof. Helcio Rangel Barreto Orlande

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2013

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Filipe Augusto Serrão Matias, por todo o apoio que me foi dado durante uma das fases mais difíceis da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Elizabeth e João Carlos, e ao meu namorado, Filipe, por toda estrutura, apoio e carinho que me foram dados durante a minha graduação.

Ao meu orientador, Marcelo José Colaço, por ter me dado a oportunidade de realizar este projeto e pelo suporte durante todo o seu desenvolvimento.

À banca examinadora, composta pelos professores Albino José Kalab Leiroz e Helcio Rangel Barreto Orlande, pela atenção e disponibilidade de presença para a minha apresentação.

Novamente, aos professores Marcelo José Colaço e Albino José Kalab Leiroz, pois sem eles, meu interesse por Máquinas Térmicas, não haveria sido despertado em sua plenitude.

Aos meus amigos Carina, Yuri, Raquel e Luis Felipe pelo companheirismo ao cursar Engenharia Mecânica juntos.

À Deus, pela oportunidade e conclusão desta etapa.

RESUMO

Este projeto final de graduação apresenta uma análise termodinâmica de um ciclo de Turbina a Gás com injeção de vapor na Câmara de Combustão, com combustão completa, e otimização de sua potência específica e rendimento térmico pelo Método do Gradiente Conjugado programado em Fortran.

Estudos comportamentais para diferentes combustíveis e estados de vapor injetado são abordados, além de uma breve análise econômica.

ABSTRACT

This Undergraduate Project presents a thermodynamic analysis of a Gas Turbine cycle with steam injection into Combustion Chamber, with complete combustion, and optimization of their specific power and thermal efficiency using the Conjugate Gradient Method by programming in Fortran.

Studies for different fuels and steam injected are presented. Furthermore, a brief economic analysis is made.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	OBJETIVO DO TRABALHO	2
2.	OBTENÇÃO DE DADOS	4
2.1.	DADOS	4
2.2.	CONTRIBUIÇÕES	4
2.3.	DIFICULDADES	5
3.	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA FÍSICO	7
3.1.	HIPÓTESES	9
3.2.	EQUACIONAMENTO	10
4.	MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO	18
4.1.	MÉTODO STEEPEST DESCENT	18
4.2.	MÉTODO DO GRADIENTE CONJUGADO	19
4.3.	APLICAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO NO PROBLEMA FÍSICO	19
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	21
5.1.	FUNCIONAMENTO DO PROGRAMA	21
5.2.	ABORDAGEM SEM OTIMIZAÇÃO	22
5.3.	ABORDAGEM COM OTIMIZAÇÃO	26
5.4.	COMPARAÇÃO ENTRE AS PORCENTAGENS DE VAPOR ABORDADAS	35
5.5.	ANÁLISE PARA OS DEMAIS COMBUSTÍVEIS CITADOS	36
5.5.1.	PARA CH_4 (METANO)	36
5.5.2.	PARA $C_{14}H_{30}$ (DIESEL)	45
5.6.	OTIMIZAÇÃO UTILIZANDO VAPOR SUPERAQUECIDO	52
5.7.	TEMPERATURA DE EXAUSTÃO, T_6	56
5.8.	MISFIRE	58
6.	CONCLUSÕES	60

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
APÊNDICE - PROGRAMAS EM FORTRAN	63
1) Programação em Fortran para otimização da potência específica com injeção de vapor saturado seco na câmara de combustão	64
2) Programação em Fortran para otimização da eficiência com injeção de vapor saturado seco na câmara de combustão	80

1. INTRODUÇÃO

Em 1976 Cheng propôs uma Turbina a Gás na qual o calor advindo da exaustão dos gases pela descarga da Turbina seria usado para aquecer e gerar vapor em uma Caldeira de Recuperação (HRSG, Heat Recovery Steam Generator) e, assim, utiliza-lo injetando-o na Câmara de Combustão [1].

Segundo Borat [2] a injeção de vapor na Câmara de Combustão aumenta a potência líquida e a eficiência da Turbina a Gás devido à entalpia e a massa adicional do vapor.

Além disso, Bathie [3] e Colaço [4] nos dizem que a injeção de vapor na Câmara de Combustão:

- reduz a emissão de NO_x ;
- possui uma implementação de fácil modificação no Ciclo Básico;
- possui um custo de utilização menor do que o uso de um Ciclo Combinado;
- pode ser convertido em um Ciclo Combinado.

Com relação à emissão de NO_x , Cârdú e Baica [5] nos dizem que a injeção de vapor na Câmara de Combustão é bastante usada como forma de diminuição das emissões de poluentes.

Temos ainda que, para Cârdú e Baica [5], o uso de vapor em turbinas a gás pode resolver problemas de resfriamentos de componentes da mesma, uma vez que operam em temperaturas muito altas.

Embora um Ciclo Combinado possua maior eficiência do que um ciclo de injeção de vapor em Turbina a Gás, existem casos em que por motivos econômicos, práticos ou técnicos, a escolha de um Ciclo Brayton com Injeção de vapor mostra-se mais viável economicamente. Segundo De Paepe e Dick [1], Ciclos Combinados são apenas encontrados para aplicações em que se produz 10MWe ou mais. Para esta escala, obtêm-se uma máxima eficiência. Sua eficiência decai para potências menores, devido a uma diminuição do rendimento de seus componentes. Então, para potências menores que 10MWe, o uso de Ciclos Combinados não é tão eficiente, enquanto que o ciclo com

injeção de vapor nos responde com melhor desempenho, além de possuir menor custo de instalação que um Ciclo Combinado.

Deve-se relatar que existe uma quantidade relevante de pesquisas publicadas com injeção de vapor na Câmara de Combustão, como por exemplo:

Iman Janghorban Esfahani [6] propôs uma adaptação de uma planta de dessalinização de água, com uma Turbina de injeção de vapor na câmara de combustão. Foi realizada uma análise econômica para encontrar o método de aquecimento do vapor que retornasse a melhor razão Custo/Benefício. Algumas variáveis foram consideradas para otimizar o ciclo em busca do caso de melhor benefício econômico, dentre elas estão: aspectos termodinâmicos, econômicos e ambientais; assim como o valor de mercado do produto da empresa (a água dessalinizada).

Livshits e Kribus [7] fizeram uma análise termodinâmica de um ciclo híbrido de injeção de vapor na Turbina a Gás utilizando-se do calor dos gases de exaustão da turbina e da energia solar para aquecer a água injetada na câmara de combustão. Além do ganho de eficiência devido a injeção de calor, foi realizada uma análise comparativa com outras plantas de energia solar. Concluiu-se que a planta da turbina com sistema de aquecimento do vapor híbrido tinha uma eficiência de conversão da energia solar similar em relação a outras plantas. Como os equipamentos podem ser bem mais baratos que os das plantas movidas exclusivamente a energia solar, a implementação é bastante vantajosa.

1.1. OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo do presente trabalho é o estudo, análise e posterior otimização do comportamento de um ciclo de Turbina a Gás com injeção de vapor tendo, em vista a otimização da potência específica em um momento e do rendimento térmico em outro.

Será considerada a injeção de vapor saturado seco na Câmara de Combustão, fazendo-se combinações entre diferentes porcentagens de injeção de vapor na Câmara de Combustão e temperaturas na entrada da Turbina e, posteriormente, o vapor será modificado para vapor superaquecido. Paralelamente será feita uma análise para mais de um tipo de combustível: Gás Natural, iso-Octano e óleo Diesel.

Para isto foi feita uma programação do ciclo termodinâmico e sua otimização, baseada no Método do Gradiente Conjugado, em linguagem Fortran, onde foram considerados dados de entrada pré-estabelecidos e, assim, o programa nos retornou os dados desejados.

2. OBTENÇÃO DE DADOS

2.1. DADOS

Os dados para análise do estudo termodinâmico e sua otimização foram obtidos através das tabelas termodinâmicas de Bathie [3], para os reagentes e produtos de combustão, considerados como gases ideais (exceto o vapor nos reagentes) e do *NISTIR 5078* [8] para os estados da água antes da Câmara de Combustão.

Para a análise do combustível Diesel, por não encontrar-se presente em Bathie [3] foi feita uma pesquisa sobre suas propriedades e encontrou-se em Ghosh *et al.*[9] que sua fórmula química é uma composição de diversos hidrocarbonetos diferentes, mas que possui uma relação aproximadamente constante para 85% de carbono e 15% de hidrogênio. Apesar do Diesel, em geral, possuir cadeias de 10 a 28 carbonos, geralmente aproxima-se sua composição para cadeias de $C_{14}H_{30}$.

Para o valor do Poder Calorífico Inferior, *PCI*, e entalpia de formação, o Diesel possui 42791 kJ/kg [10] e -403000 J/mol [11], respectivamente.

2.2. CONTRIBUIÇÕES

Para este trabalho, foi cedida por Sami. M. Ayad uma serie de sub-rotinas e funções capazes de consultar as tabelas termodinâmicas de Bathie [3] e de *NISTIR 5078* [8] e interpolar os valores, retornando os dados esperados. Seu trabalho foi de extrema importância para auxiliar nos cálculos. Graças a ele, foi economizado muito tempo que seria gasto para criar tais sub-rotinas e funções, além de digitar todas as tabelas manualmente.

2.3. DIFICULDADES

Durante a execução do presente trabalho, foram descobertos erros de digitação para os dados e fórmulas consultados.

O principal e mais difícil de ser descoberto foi um erro de digitação de um único dígito em uma entalpia das tabelas termodinâmicas do ar do livro Bathie [3], na página 421, reproduzida na Figura 2.1. Este único erro gerou um grande atraso na finalização do programa feito em Fortran.

Inicialmente os gráficos eram gerados com muitos defeitos. Após sucessivos testes no programa foi considerado que o mesmo já não continha mais erros em sua linguagem.

O próximo passo foi analisar as tabelas e sua vasta extensão de dados. Assim, finalmente, foi descoberto o erro que conduzia a um grande desvio dos dados compilados e fornecidos como resultados pelo programa.

TABLE B.1. **Properties of Dry Air at 1 atm (SI)**

Temp K	C_p° kJ/kg K	h° kJ/kg	s° kJ/kg K	Pr
730.	1.082	443.4	7.6218	33.831
735.	1.083	448.9	7.6292	34.713
740.	1.085	454.3	7.6366	35.613
745.	1.086	459.7	7.6439	36.531
750.	1.087	465.1	7.6511	37.468
755.	1.088	470.6	7.6584	38.423
760.	1.089	476.0	7.6655	39.397
765.	1.091	481.5	7.6727	40.390
770.	1.092	486.9	7.6798	41.402
775.	1.093	492.4	7.6869	42.434
780.	1.094	497.8	7.6939	43.487
785.	1.095	503.3	7.7009	44.559
790.	1.096	508.8	7.7079	45.652
795.	1.098	514.3	7.7148	46.766
800.	1.099	519.8	7.7217	47.902
805.	1.100	525.3	7.7285	49.058
810.	1.101	530.8	7.7353	50.24
815.	1.102	536.3	7.7421	51.44
820.	1.104	541.8	7.7489	52.66
825.	1.105	547.3	7.7556	53.91
830.	1.106	552.8	7.7622	55.17
835.	1.107	558.4	7.7689	56.47
840.	1.108	563.9	7.7755	57.78
845.	1.109	569.5	7.7821	59.12
850.	1.110	575.0	7.7886	60.49
855.	1.112	580.6	7.7951	61.87
860.	1.113	586.1	7.8016	63.29
865.	1.114	591.7	7.8081	64.73
870.	1.115	597.3	7.8145	66.19
875.	1.116	602.8	7.8209	67.68
880.	1.117	608.4	7.8273	69.20
885.	1.118	614.0	7.8336	70.74
890.	1.119	619.6	7.8399	72.31
895.	1.120	525.2	7.8462	73.91
900.	1.121	630.8	7.8524	75.53

Figura 2.1 – tabela do Bathie [3] com o dado digitado errado marcado em
vermelho

Foi feita uma regressão linear entre os valores imediatamente antes e depois do dado incorreto e obteve-se 625,2, ao invés de 525,2. Então, constatou-se que se tratava de um erro de digitação em que houve troca do “6” pelo “5” no primeiro dígito da entalpia.

3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA FÍSICO

Neste capítulo demonstraremos qual foi o raciocínio abordado para implementação no programa.

Nosso problema físico trata-se de um ciclo Brayton com injeção de vapor na Câmara de Combustão, conforme mostrado na Figura 3.1,

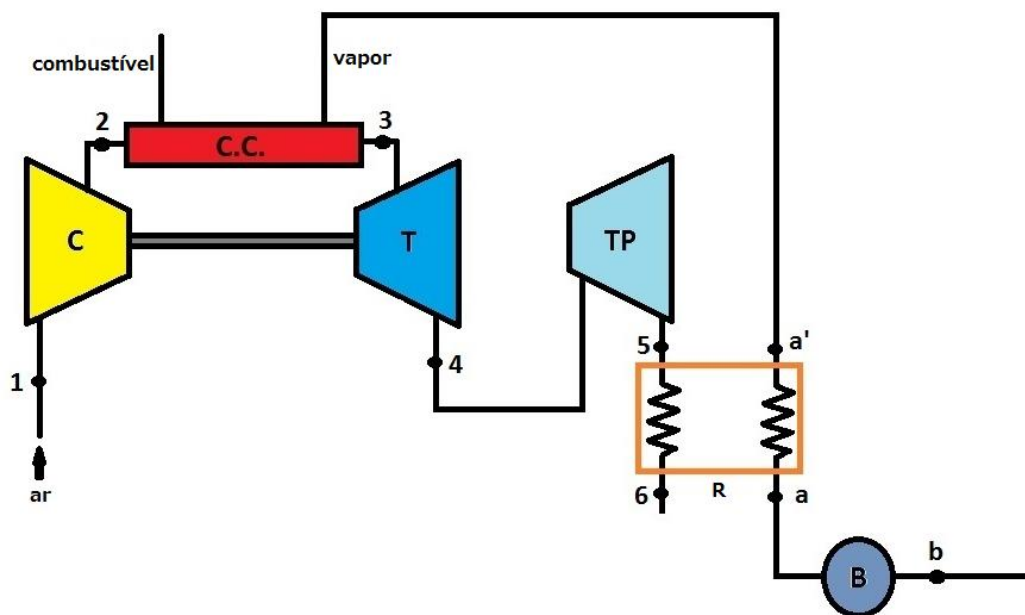


Figura 3.1 – Ciclo Brayton com injeção de vapor

onde:

C = Compressor;

CC = Câmara de Combustão;

T = Turbina a Gás;

TP = Turbina de Potência;

B = Bomba;

R = Renegerador ou Caldeira de Recuperação.

Este Ciclo, como podemos ver pela Figura 3.1, é composto por um Compressor (idealmente responsável por uma compressão isentrópica), uma Câmara de Combustão (onde ocorre combustão completa do combustível à pressão constante, considerando

entrada de ar e vapor), uma Turbina a Gás (responsável por acionar o Compressor, idealmente ela expande os gases provenientes da saída da Câmara de Combustão isentropicamente), Turbina de Potência (idealmente responsável pela geração da Potência e pela continuação da expansão isentrópica dos gases), Bomba e o Regenerador (responsável pela troca de calor entre os gases da exaustão da Turbina de Potência e a água impulsionada pela Bomba, mudando o seu estado para vapor antes da injeção na Câmara de Combustão).

Neste ciclo são calculados os trabalhos da Bomba, do Compressor e das Turbinas, considerando as diferenças de entalpia para os pontos do ciclo tratados.

Os processos isentrópicos da Bomba, Compressor e Turbinas também foram abordados, sendo que foi considerada uma mistura de gases ideais para as Turbinas.

Os componentes do ciclo são considerados termicamente perfeitos, ou seja, C_p e C_v variam com a temperatura. Então, devemos considerar as pressões relativas, P_r , para analisarmos o estado do ar que sai do Compressor.

Para execução dos cálculos, como havia sido mencionado anteriormente, foram consultadas as tabelas termodinâmicas de Bathie [3] e de NISTIR 5078 [8], sendo que os dados obtidos pela segunda tabela foram convertidos para os valores de referência de Bathie [3], como explicado na seção 3.2.

Nossa finalidade, com os cálculos que serão apresentados a seguir, será obter a potência específica e o rendimento térmico do ciclo, para que possamos otimiza-los separadamente no programa, bem como a obtenção de outros dados que nos auxiliem na análise do ciclo termodinâmico nos próximos capítulos.

3.1. HIPÓTESES

Para nosso problema físico em questão foram considerados dados de entrada que são fixos para todos os dados gerados (exceto P_2 e o estado do vapor injetado). São eles:

- $T_1 = 288\text{K}$ (temperatura do ar na entrada do compressor);
- $P_1 = 101,3\text{kPa}$ (pressão do ar na entrada do compressor);
- $P_5 = 101,3\text{kPa}$ (pressão na saída da Turbina de Potência);
- P_2 inicial (pressão inicial na Câmara de Combustão) *;
- $T_{comb} = 298,15\text{K}$ (temperatura do combustível);
- $T_b = 303,15\text{K}$ (temperatura da água na entrada da Bomba);
- $P_b = 101,3\text{kPa}$ (pressão de entrada na Bomba);
- $P_w = 1378,2\text{kPa}$ (pressão da água, após a saída da Bomba);
- $\dot{m} = 0,45\text{kg/s}$ (vazão mássica de ar que entra no Compressor);
- $\eta_c = 87\%$ (rendimento do Compressor);
- $\eta_t = 89\%$ (rendimento da Turbina);
- $\eta_{tp} = 89\%$ (rendimento da Turbina de Potência);
- $\eta_{reg} = 100\%$ (rendimento do Regenerador);
- $\eta_b = 100\%$ (rendimento da Bomba);
- Injeção de vapor no estado saturado seco (posteriormente será considerado vapor superaquecido);
- Vapor após a saída da Câmara de Combustão foi aproximado como gás ideal, assim como os demais produtos;
- Ar como fluido real;

* Após uma pressão inicial P_2 para a saída do Compressor, esta pressão aumentará, uma vez que a razão de compressão subirá conforme a otimização atuar, procurando a razão de compressão ótima para o parâmetro desejado.

- Gases termicamente perfeitos;
- Combustão completa;
- Não há perda de carga na Câmara de Combustão e nem nas tubulações.

Os dados fornecidos pelo usuário do programa para compilação são:

- T_3 (temperatura da mistura na entrada da turbina);
- i (vazão mássica de vapor que é injetado no ciclo, como percentual da massa de ar);
- Tipo de combustível adicionado na Câmara de Combustão.

3.2. EQUACIONAMENTO

A seguir demonstraremos a sequência dos cálculos realizados pelo programa, dividindo por componentes:

a) Bomba:

Para uma pressão de entrada de 101,3 kPa e temperatura de 30°C (303,15K), a água entra na bomba como líquido comprimido [8].

Através da tabela de líquido comprimido [8], obtemos h_b (entalpia da água na entrada da bomba) e s_b (entropia da água na entrada da bomba). Assumindo que a Bomba trabalha isentropicamente, temos:

$$s_a = s_b \quad (3.1)$$

Através da Pressão P_w e da entropia s_a , podemos obter a entalpia h_a do ponto a, ou seja, da água na saída da bomba.

Posteriormente, tais dados obtidos foram convertidos para os valores de referência de Bathie [3], a partir da entalpia de formação de -285830 kJ/kmol e entropia de formação de 69,95 kJ/kmol K para condensados [11]. Logo, obtemos \bar{h}_a , \bar{h}_b , \bar{s}_a e \bar{s}_b .

Então, calcula-se a potência da bomba pela equação 3.2, lembrando que foi considerada uma eficiência de 100%:

$$\dot{W}_b = \frac{txMw (\bar{h}_a - \bar{h}_b)}{M_{H_2O}} \quad (3.2)$$

onde $txMw$ é a vazão mássica de vapor e M_{H_2O} é a massa molecular da água.

b) Compressor:

A partir de agora utilizaremos apenas as tabelas disponíveis em Bathie [3].

Para temperatura T_1 e pressão P_1 do ar na entrada do compressor, obtemos h_1 e Pr_1 , onde Pr_1 é a pressão relativa do ar na entrada do compressor.

Admitindo o compressor isentrópico, temos que:

$$Pr_{2_i}/Pr_1 = P_2/P_1. \quad (3.3)$$

Dado P_2 e P_1 e, obtido Pr_1 , podemos encontramos Pr_{2_i} com a equação 3.3. Assim, volta-se à tabela para encontrar a entalpia ideal na saída do compressor, h_{2_i} , a partir de Pr_{2_i} .

O trabalho específico ideal do compressor, dado pela diferença de entalpias da entrada e da saída ideal, será:

$$w_{c_i} = h_{2_i} - h_1. \quad (3.4)$$

Para um rendimento do compressor, η_c , teremos um trabalho real:

$$w_c = w_{c_i}/\eta_c \quad (3.5)$$

Então, entalpia real na saída do compressor, substituindo 3.5 em 3.4, é obtida por:

$$h_2 = h_1 + w_c. \quad (3.6)$$

Assim, encontra-se a temperatura real T_2 na saída do compressor, já que temos ar como gás ideal e temos h_2 .

Para facilitar os cálculos, consideraremos 1,0 kg/s de ar entrando no Compressor e, posteriormente, faremos a conversão para txm kg/s.

c) Câmara de Combustão:

Na nossa análise física não utilizaremos o conceito de ar-equivalente, pois analisando cada componente dos produtos que saem da Câmara de Combustão, obtemos resultados mais acurados. Consideraremos, portanto, uma mistura de gases ideais nos produtos de combustão.

Por Bathie [3] temos que os valores de massa de vapor na entrada da Câmara de Combustão são, usualmente, entre 2 e 3% da massa de ar que entra no Compressor, mas essa porcentagem pode ser tão alta quanto 5%.

O vapor que entra na Câmara de Combustão está, nesta primeira análise, no estado saturado seco.

Através das tabelas de *NISTIR 5078* [8], para P_w , podemos encontrar a temperatura de saturação, T_{ar} , e entalpia de saturação, h_{ar} , do vapor na entrada da Câmara de Combustão. Os valores também foram posteriormente convertidos para a referência de Bathie [3] de forma análoga à descrita anteriormente.

Então, na entrada da Câmara de Combustão, temos:

- Combustível à temperatura dada, T_{comb} ;
- O_2 , N_2 e Excesso de Ar à temperatura T_2 ;
- Vapor d'água à temperatura T_{ar} .

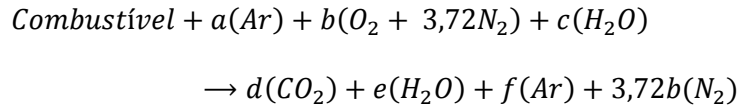
Assim, através do balanço estequiométrico, da relação entre a massa de ar que entra no compressor e a massa de água que entra na Câmara de Combustão,

$$(a M_{ar}) + [b(M_{O_2} + 3,72 M_{N_2})] = i c M_{H_2O} \quad (3.7)$$

além da conservação de energia entre as entalpias dos produtos e dos reagentes,

$$H_p = H_r \quad (3.8)$$

obtemos os coeficientes da equação química dados por:



onde a fórmula do combustível será interpretada por $C_C H_H$ pelo programa, já que o mesmo foi projetado para hidrocarbonetos. Então, o programa pede como dado de entrada o número de Carbonos e de Hidrogênios que a fórmula química do combustível possui.

A razão Combustível/Ar (F/A) é dada por:

$$\frac{F}{A} = \frac{(C M_C) + (H M_H)}{(a M_{Ar}) + [b(M_{O_2} + 3,72 M_{N_2})]} \quad (3.9)$$

onde M_C , M_H , M_{Ar} , M_{O_2} , M_{N_2} são os pesos moleculares do carbono, hidrogênio, ar, oxigênio e nitrogênio, respectivamente.

Então, a partir dos coeficientes da equação química, dos pesos moleculares e da massa dada de algum dos componentes da equação química, podemos descobrir, por estequiometria, qual a massa dos demais componentes da equação. Para este caso baseou-se na vazão mássica de água que entra na Câmara de Combustão, devido à facilidade dos cálculos. A Figura 3.2 ilustra tal relação estequiométrica comentada, onde os resultados são obtidos por regra de três:

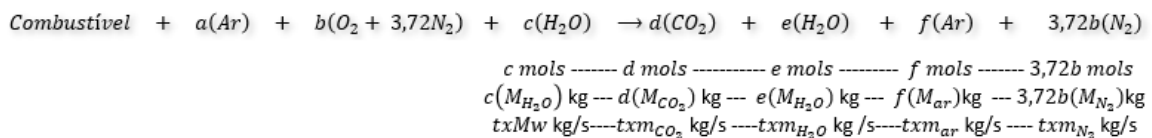


Figura 3.2 – Estequiometria da reação química do problema físico.

onde $txMw$, txm_{CO_2} , txm_{H_2O} , txm_{Ar} e txm_{N_2} são, respectivamente, as vazões mássicas de H_2O nos reagentes e de CO_2 , H_2O , ar e N_2 nos produtos.

Desta forma pode-se encontrar, através da massa de cada componente encontrada e dos pesos moleculares dos mesmos, os mols de cada componente do produto e, por consequência, as suas frações molares. Uma vez que o número de mols é dado por:

$$n_i = \frac{m_i}{M_i} \quad (3.10)$$

e fração molar é dada por:

$$y_i = \frac{n_i}{\sum n_i} \quad (3.11)$$

Onde n_i , m_i , M_i e y_i são, respectivamente, o número de mols, massa, peso molecular e fração molar de cada componente químico.

d) Turbina a Gás:

Sabe-se que o trabalho real realizado no Compressor é inteiramente alimentado pelo trabalho real da Turbina:

$$W_c = W_t \quad (3.12)$$

As entalpias molares calculadas, em função de 1kmol de combustível que entra na Câmara de Combustão, para a mistura de gases na entrada e saída da Turbina, Turbina de Potência e Regenerador são dadas por:

$$\begin{aligned} \bar{h}_i = & (d \bar{h}_{CO_2, T_i}) + (e \bar{h}_{H_2O, T_i}) + \\ & + (28,965 f \bar{h}_{Ar, T_i}) + (3,72 b \bar{h}_{N_2, T_i}) \end{aligned} \quad (3.13)$$

A equação 3.13 é uma equação geral para a entalpia que leva em consideração a mistura de gases ideais em cada ponto do ciclo após a saída da Câmara de Combustão. Nesta equação, o subscrito “i” descreve qual ponto estamos tratando nos cálculos e, consequentemente, T_i refere-se à temperatura do ponto “i”.

As entropias também serão calculadas por uma equação geral, dada por:

$$\begin{aligned} \bar{s}_i = & (y_{CO_2} \bar{s}_{CO_2, T_i}) + (y_{H_2O} \bar{s}_{H_2O, T_i}) + (28,965 y_{Ar} \bar{s}_{Ar, T_i}) + \\ & + (y_{N_2} \bar{s}_{N_2, T_i}) \end{aligned} \quad (3.14)$$

onde “i” e T_i possuem a mesma descrição que o caso da equação 3.13.

Como as entalpias e entropias estão em base molar, devemos converter o trabalho da Turbina para base molar considerando a razão Combustível/Ar e o peso molecular

do combustível. Sendo assim, colocaremos o trabalho da Turbina em função de 1kmol de combustível que entra na Câmara de Combustão:

$$\bar{w}_t = \frac{w_t M_{combustível}}{F/A} \quad (3.15)$$

onde $w_t = w_c$ [kJ/kg de ar no compressor].

Como T_3 é dado, temos \bar{h}_3 calculado pela equação 3.13. Então podemos encontrar \bar{h}_4 a partir de:

$$\bar{h}_4 = \bar{w}_t - \bar{h}_3 \quad (3.16)$$

Daremos início agora ao cálculo da pressão P_4 , que será necessário para fazermos os cálculos da Turbina de Potência. Para uma eficiência da Turbina a Gás, η_t , o trabalho ideal da Turbina é:

$$\bar{w}_{t_i} = \bar{w}_t / \eta_t \quad (3.17)$$

Então, analogamente, \bar{h}_{4_i} pode ser calculado por:

$$\bar{h}_{4_i} = \bar{w}_{t_i} - \bar{h}_3 \quad (3.18)$$

A temperatura T_4 é encontrada através de iterações nas quais são testadas várias temperaturas na equação 3.13 até encontrar uma temperatura que faça com que a entalpia \bar{h}_4 calculada por esta equação alcance a convergência para a entalpia \bar{h}_4 obtida do cálculo da equação 3.16, com um erro relativo de 10^{-12} . O cálculo de T_{4_i} é feito de forma análoga, considerando \bar{h}_{4_i} nas equações 3.13 e 3.18.

Para o Cálculo da Pressão de saída da turbina, P_4 , primeiramente obtemos as entropias molares \bar{s}_3 e \bar{s}_{4_i} através da equação 3.14 e das temperaturas T_3 e T_{4_i} . Como se trata de uma mistura, podemos descobrir P_4 através da fórmula isentrópica para mistura [3]:

$$\bar{s}_3 - \bar{s}_{4_i} = \bar{R} \ln \left(\frac{P_3}{P_4} \right) * \quad (3.19)$$

* Para dedução da fórmula, ver o capítulo 2 “Thermodynamics do livro: Fundamental of Gas Turbines“, p. 36-40.

onde \bar{R} é a constante universal dos gases (8,314 J/Kmol).

A taxa de calor adicionado ao ciclo, \dot{Q}_h , deve ser obtida através das propriedades do combustível e da sua vazão mássica ($txm \text{ } F/A$), calculando:

$$\dot{Q}_h = txm \text{ } F/A \text{ } PCI, \quad (3.20)$$

e) Turbina de Potência:

Para o cálculo do trabalho da Turbina de Potência, partimos da pressão P_4 e do dado de projeto P_5 .

Devemos calcular a entropia \bar{s}_4 pela equação 3.15. Então, com P_4 , P_5 e \bar{s}_4 , deve-se efetuar os cálculos análogos à equação 3.19 para obtenção da entropia \bar{s}_{5_i} , considerando o ponto 4 real. Como \bar{s}_{5_i} também pode ser obtida utilizando a equação 3.14, para descobrirmos qual é a temperatura ideal do estado 5, T_{5_i} , devemos testar valores de temperatura em 3.14 até que haja convergência da entropia resultante da equação 3.14 com a entropia advinda da equação 3.19. No programa, tais loops para esta convergência foram comandados para se finalizarem quando o erro relativo fosse inferior a 10^{-12} .

Com \bar{h}_4 e \bar{h}_{5_i} , podemos, então, calcular o trabalho molar ideal realizado pela turbina de potência:

$$\bar{w}_{tp_i} = \bar{h}_4 - \bar{h}_{5_i} \quad (3.21)$$

Para convertermos o trabalho para a base mássica, devemos multiplicar o trabalho pela razão Combustível/Ar e dividir pelo peso molecular do combustível.

$$w_{tp_i} = \frac{\bar{w}_{tp_i} \text{ } F/A}{M_{combustível}} \quad (3.22)$$

A potência ideal da Turbina, \dot{W}_{tp_i} , para a vazão mássica considerada em nosso problema físico, txm , será dada por:

$$\dot{W}_{tpi} = txm w_{tpi} \quad (3.23)$$

Logo, a potência real da Turbina de Potência é:

$$\dot{W}_{tp} = \dot{W}_{tpi} \eta_{tp} \quad (3.24)$$

Podemos definir a potência específica como:

$$\dot{W}_{específica} = \frac{(\dot{W}_{tp} - \dot{W}_b)}{txm C_p(T_1) T_1} \quad (3.25)$$

onde $C_p(T_1)$ e T_1 são relativos ao ar que entra no compressor.

Por fim, o rendimento térmico do ciclo, η_{th} , é calculado por:

$$\eta_{th} = \frac{(\dot{W}_{tp} - \dot{W}_b)}{\dot{Q}_h} \quad (3.26)$$

f) Regenerador:

Partindo dos dados \bar{h}_4 , \bar{w}_{tpi} e η_{tp} , obtidos anteriormente, podemos obter \bar{h}_5 .

O trabalho real da Turbina de Potência, em função de 1kmol de combustível, é dado por:

$$\bar{w}_{tp} = \bar{w}_{tpi} \eta_{tp} \quad (3.27)$$

então, \bar{h}_5 é:

$$\bar{h}_5 = \bar{h}_4 - \bar{w}_{tp} \quad (3.28)$$

A temperatura T_5 deve ser encontrada realizando testes de temperatura em 3.13 até alcançar a convergência da entalpia obtida em 3.13 com a entalpia de 3.28, com um erro relativo de 10^{-12} .

Assumindo que o regenerador é ideal, a entalpia h_6 é obtida pela seguinte equação:

$$txMw (h_{a'} - h_a) = txm_{total} (\bar{h}_5 - \bar{h}_6) \quad (3.29)$$

onde txm_{total} é a vazão mássica total do somatório de txm_{CO_2} , txm_{H_2O} , txm_{ar} e txm_{N_2} .

A temperatura T_6 é obtida através de iterações de temperaturas na equação 3.13 até que se encontre uma temperatura que corresponda à entalpia advinda da equação 3.29, com um erro relativo de 10^{-12} .

4. MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

Na linguagem programada, para otimização dos parâmetros a serem maximizados no problema físico, foi utilizado inicialmente o Método Steepest Descent e, posteriormente, o Método do Gradiente Conjugado.

4.1. MÉTODO STEEPEST DESCENT

É um método determinístico aplicado para minimização de problemas lineares e não-lineares, onde se estabelece um processo iterativo até a convergência de um valor mínimo da função objetivo, $U(x^k)$. Consiste em percorrer a direção em que a função objetivo tem maior taxa de redução.

Seu método iterativo pode ser descrito como:

$$x^{k+1} = x^k + (\alpha d^k) \quad (4.1)$$

onde:

x = vetor de variáveis;

α = passo de procura;

d = vetor de direção de procura;

k = contador de iterações.

Para deste método:

$$d^k = -\nabla U(x^k) \quad (4.2)$$

pois a direção em que a função objetivo, U , varia mais rápido é dada pelo seu gradiente, normal às linhas de $U=\text{constante}$.

Por Colaço, *et al* [12] este método inicia com uma grande variação da função objetivo. No entanto, quando o valor ótimo está próximo a ser alcançado, a convergência se torna lenta.

4.2. MÉTODO DO GRADIENTE CONJUGADO

Este método foi utilizado após o uso inicial do Método Steepest Descent, por apresentar uma convergência mais rápida e melhor.

Para este método:

$$\mathbf{d}^k = -\nabla U(\mathbf{x}^k) + (\gamma^k \mathbf{d}^{k-1}), \quad (4.3)$$

onde γ^k é um coeficiente de conjugação.

Neste método a direção de procura é uma combinação linear da direção do gradiente na iteração atual com a direção da iteração anterior [12].

Existem vários métodos para o cálculo de γ^k , sendo o Método de Fletcher-Reeves o mais usado. A partir deste método, temos:

$$\gamma^k = \frac{\|\nabla U(\mathbf{x}^k)\|^2}{\|\nabla U(\mathbf{x}^{k-1})\|^2} \quad (4.4)$$

onde $\gamma^k = 0$ para $k = 0$.

4.3. APLICAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO NO PROBLEMA FÍSICO

O Método do Gradiente Conjugado caminha numa direção de mínimo da função. Então, para cada função objetivo que nos interessou otimizar, multiplicou-se a função por -1 , com a finalidade de se obter uma convergência para a maximização de tais funções.

Neste trabalho, o vetor de variáveis, \mathbf{x} , foi atribuído à razão de compressão.

Como existem Turbinas que possuem razões de compressão superiores a 40, foi imposta uma restrição na otimização para que a razão de compressão máxima fosse de 50. Para valores maiores que 50 o loop de otimização se finalizaria.

Primeiramente foi feita a otimização da potência específica, ou seja,

$$\dot{W}_{específica} = \frac{(\dot{W}_{tp} - \dot{W}_b)}{t_{xm} C_p(T_1) T_1} \quad (4.5)$$

onde $C_p(T_1)$ e T_1 são parâmetros para entrada do ar no compressor.

Deve-se observar que, como $T_1 = 288$ K para nosso problema físico, temos $C_p = 1,005$ KJ/Kmol K [3].

Posteriormente foi otimizado o rendimento térmico do ciclo, também multiplicando-o por -1 , com a intenção de maximização de sua função objetivo.

Assim, no programa, teremos:

$$\text{Função Objetivo 1} = -\dot{W}_{específica} \quad (4.6)$$

$$\text{Função Objetivo 2} = -\eta_{th} \quad (4.7)$$

Deve-se notar que foi utilizado um passo de procura, α , variável. A programação deste passo foi cedida como contribuição do meu orientador para um melhor funcionamento do programa. Mas, para α fixo, a otimização também funciona.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos neste projeto.

Primeiramente mostraremos que o programa funciona corretamente comparado com cálculos elaborados manualmente.

Em seguida será realizada uma análise sem otimização e, posteriormente, serão otimizados a potência específica e o rendimento térmico do ciclo separadamente.

Nas otimizações foram consideradas diferentes porcentagens de vapor injetado na Câmara de Combustão (1, 2, 3, 4 e 5%) para quatro temperaturas (1200, 1400, 1600 e 1800K) considerando o iso-Octano como combustível inicial.

Também foi feita uma análise da contribuição da variação de porcentagens de vapor injetado em termos de potência específica e rendimento térmico do ciclo.

Em seguida foi feita uma alteração do combustível para Gás Natural (Metano, CH_4) e óleo Diesel convencional ($C_{14}H_{30}$), realizando as mesmas análises. Também foi feita uma análise para o caso de vapor superaquecido considerando 5% de vapor injetado e o combustível iso-Octano.

Por fim foram feitas observações sobre a temperatura de exaustão, T_6 e sobre a possibilidade de ocorrência de *Misfire*.

5.1. FUNCIONAMENTO DO PROGRAMA

Cálculos foram elaborados manualmente para constatar a acurácia e eficiência do programa.

Através da Figura 5.1, foi possível fazer uma comparação entre alguns dados obtidos pelo programa e os mesmos dados obtidos manualmente, considerando como exemplo $T_3 = 1400K$, 5% de injeção de vapor saturado seco e $rc = 12$. Pode-se constatar que o programa funciona adequadamente.

Os valores obtidos pelo programa são bem próximos, tendo apresentado uma pequena diferença, pois o erro relativo das iterações feitas manualmente foi bem menos rigoroso do que o utilizado pelo programa. Desta forma conclui-se que o programa é bem mais preciso.

	s_3^*	s_4^*	s_{4i}^*	T_4^{**}	T_{4i}^{**}	T_5^{**}	T_{5i}^{**}	T_6^{**}	\dot{W}_c^{***}	\dot{W}_{tp}^{***}	η_{th}^{****}
<i>Manual</i>	237,96	229,52	228,30	942,00	909,00	705,50	676,00	705,00	154,35	134,66	38,90
<i>Programa</i>	238,18	229,72	228,51	942,01	909,29	706,15	676,07	705,87	154,35	134,39	38,66

* [kJ/kmolK]
 ** [K]
 *** [kW]
 **** [%]

Figura 5.1 – Comparação entre alguns dados obtidos manualmente e pelo programa.

5.2. ABORDAGEM SEM OTIMIZAÇÃO

Inicialmente foi feita uma abordagem sem otimização. Buscou-se compreender o funcionamento do ciclo térmico dentro de um intervalo de razão de compressão, rc , entre 8 e 50 para quatro temperaturas diferentes de saída da Câmara de Combustão. O programa foi comandado para gerar pontos com razão de compressão equidistantes, com intervalos de 0,1, até $rc = 50$.

Foi considerado o combustível C_8H_{18} e injeção de 5% de vapor saturado seco na Câmara de Combustão como exemplo para esta abordagem.

A seguir, são apresentados os gráficos obtidos para potência específica e rendimento térmico do ciclo nas Figuras 5.2 e 5.3, respectivamente:

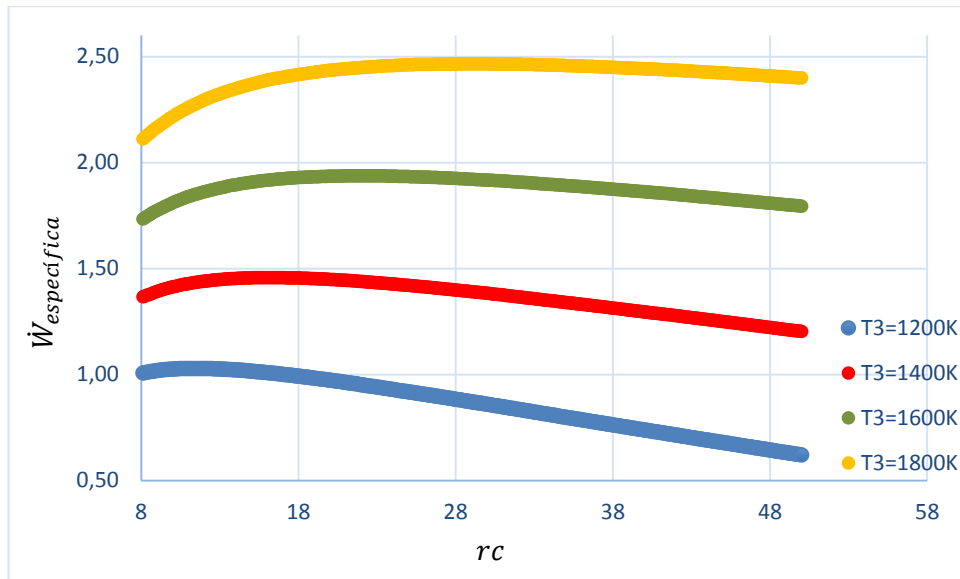


Figura 5.2 – $\dot{W}_{específica}$ por rc para C_8H_{18} , 5% de vapor injetado e quatro temperaturas.

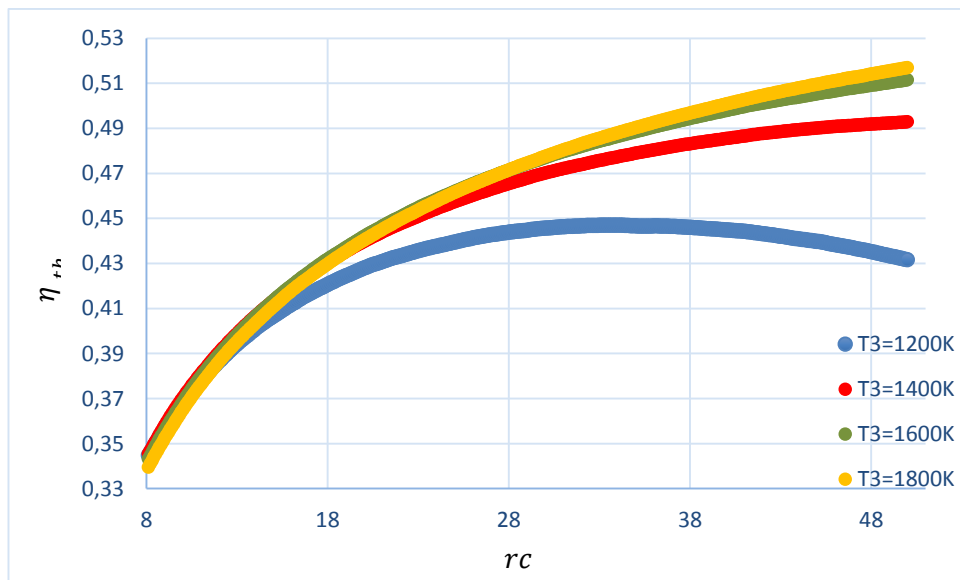


Figura 5.3 – η_{th} por rc para C_8H_{18} , 5% de vapor injetado e quatro temperaturas.

Da análise da Figura 5.2 podemos constatar que o aumento da razão de compressão, rc , faz com que a potência específica aumente até um valor ótimo, decaindo logo em seguida. Também podemos notar que quanto maior a temperatura T_3 de entrada na turbina, maior será a potência específica e maior será a razão de compressão que nos retorna uma potência específica ótima.

Analisando o gráfico para o rendimento térmico do ciclo, Figura 5.3, podemos observar que, para altas razões de compressão, quanto maior a temperatura T_3 , maior o rendimento. Contudo, para razões de compressão menores, esta relação é invertida.

No caso de razões de compressão menores que aproximadamente 12, a maior temperatura testada, 1800K, é detentora do menor rendimento. Essa relação se inverte gradativamente até que a eficiência de 1800K passa a ser maior que as eficiência de todas as outras temperaturas, em razões de compressão maiores que aproximadamente 28. Isto provavelmente se deve pelo fato de que a rc ainda é pequena para esta temperatura e, assim, existe perda de calor na saída dos gases na exaustão, havendo levemente uma menor eficiência térmica do ciclo neste intervalo.

Deve-se observar que quanto maior rc , maior a temperatura de entrada na Câmara de Combustão, T_2 , e menor a massa de combustível necessária para elevar a temperatura até a temperatura de saída da Câmara. Para o caso de $T_3 = 1200K$, $\dot{W}_{específica}$ decai aproximadamente após $rc = 10,8$ e, como a massa de combustível também cai, há uma diminuição de \dot{Q}_h , o que faz com que η_{th} continue subindo. Porém, após aproximadamente $rc = 33$, η_{th} decai, pois \dot{Q}_h passa a decair com uma taxa menos acentuada, uma vez que T_2 começa a subir mais lentamente, logo \dot{Q}_h passa a ficar com uma derivada cada vez menos negativa. Assim, como $\dot{W}_{específica}$ continua diminuindo, presencia-se uma queda de η_{th} . Os gráficos 5.4, 5.5 e 5.6 ilustram tal situação, sendo que nos mesmos foi considerada a potência líquida (onde $\dot{W}_{líquida} = \dot{W}_{tp} - \dot{W}_b$), ao invés da potência específica, com o objetivo de se obter gráficos com melhor visualização.

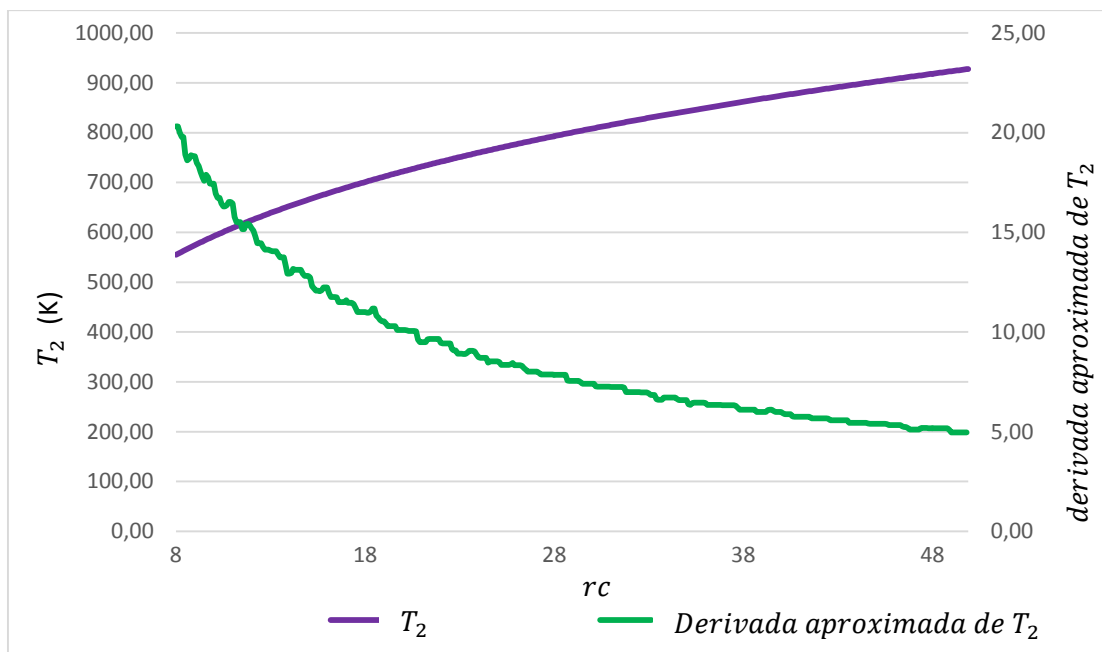


Figura 5.4 – T_2 e sua derivada aproximada por rc , para C_8H_{18} , 5% de vapor injetado.

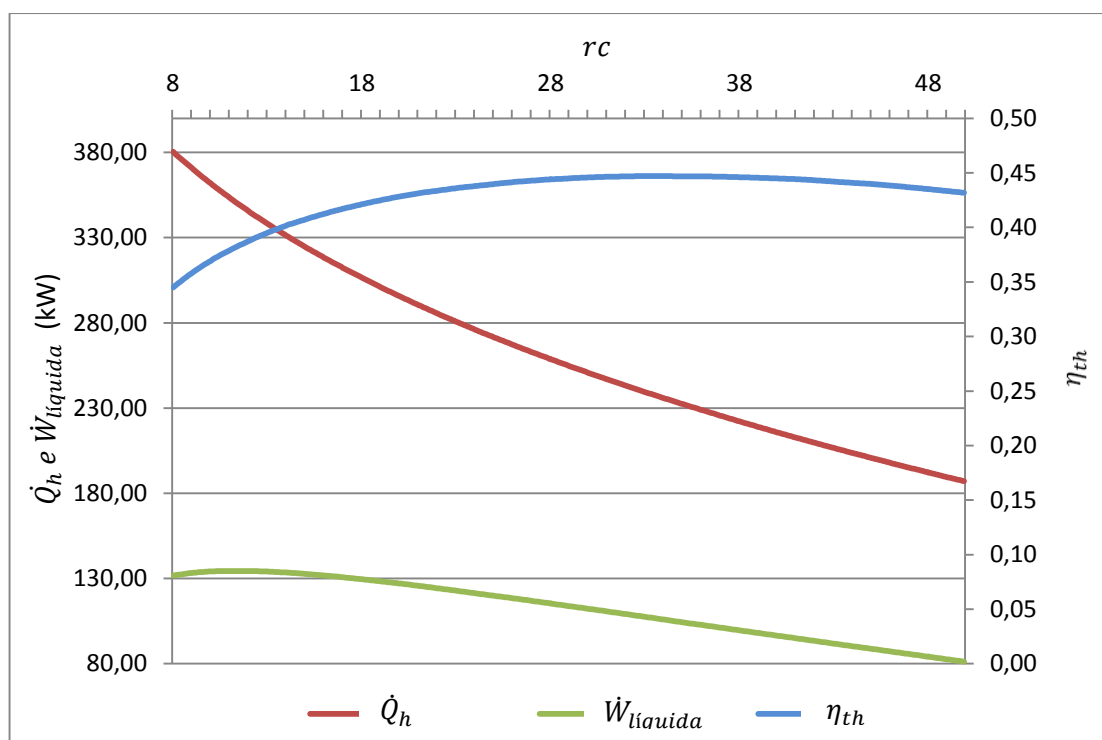


Figura 5.5 – \dot{Q}_h , $\dot{W}_{liquida}$ e η_{th} por rc , para C_8H_{18} , 5% de vapor injetado.

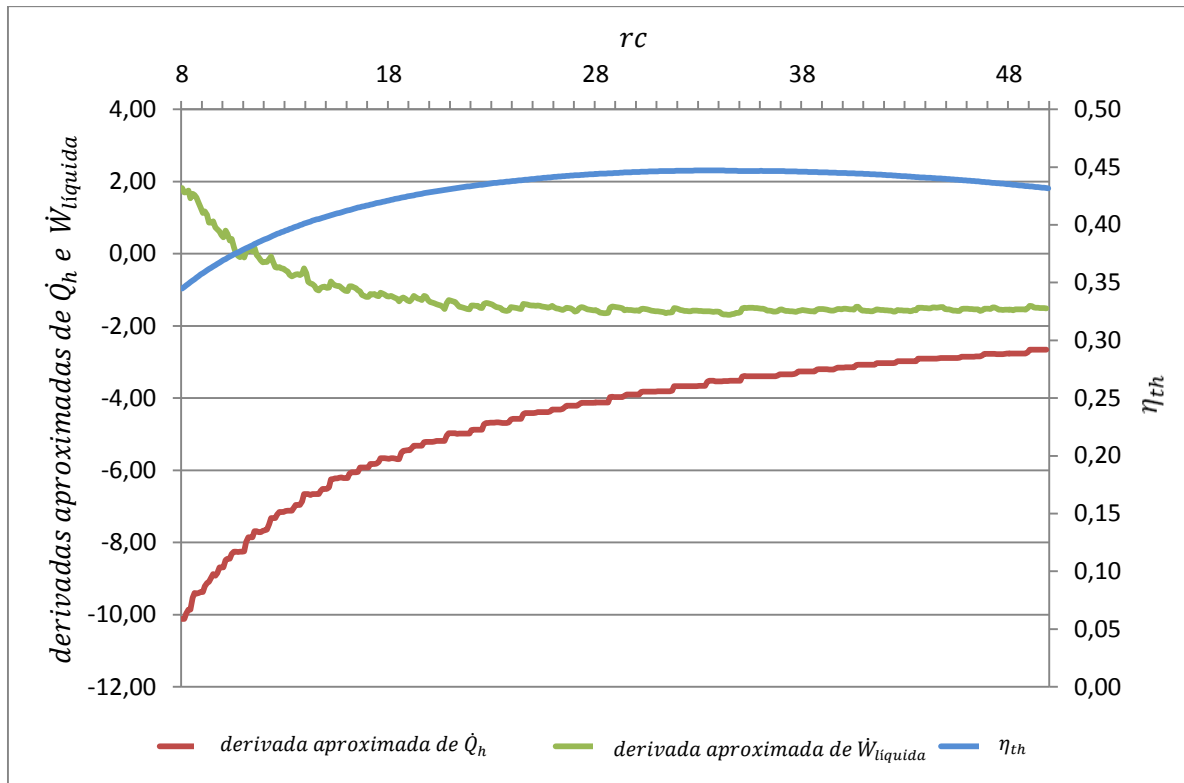


Figura 5.6 – derivada aproximada de \dot{Q}_h e $\dot{W}_{líquida}$ e η_{th} por rc , para C_8H_{18} , 5% de vapor injetado.

Deve-se tomar cuidado com pressão de descarga da Bomba, pois com o aumento da razão de compressão do Compressor, a mesma deve fornecer uma pressão de descarga que vença a pressão na Câmara de Combustão.

5.3. ABORDAGEM COM OTIMIZAÇÃO

Através do Método do Gradiente Conjugado, fez-se a otimização de $\dot{W}_{específica}$ e η_{th} , separadamente.

Para cada porcentagem de água, de 1, 2, 3, 4 e 5%, considerou-se as temperaturas de T_3 de 1200, 1400, 1600 e 1800K e o combustível iso-Octano (C_8H_{18}). Posteriormente fez-se o mesmo para o Metano (CH_4) e Diesel convencional ($C_{14}H_{30}$). Por fim, foi feita uma análise comparativa entre a entrada de vapor saturado seco e vapor superaquecido considerando como exemplo o C_8H_{18} , 5% de água e $T_3=1800k$.

As simulações são apresentadas a seguir:

a) Otimização de $\dot{W}_{específica}$ para C_8H_{18} com injeção de 5% de vapor:

Observa-se pela Figura 5.7 que os quatro casos de temperaturas de entrada da Turbina foram otimizados com sucesso, com maximização da função objetivo durante as iterações.

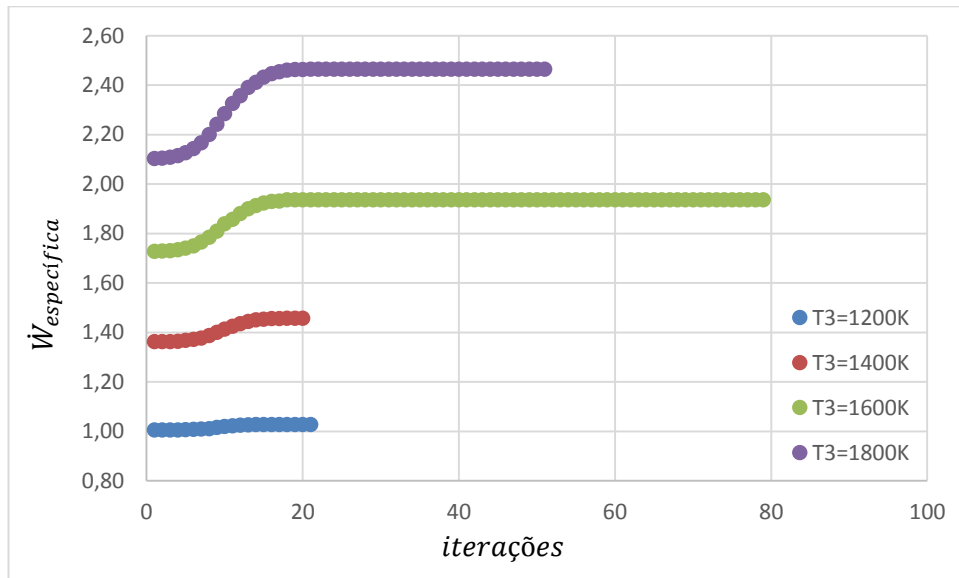


Figura 5.7 – $\dot{W}_{específica}$ por iterações, para C_8H_{18} com injeção de 5% de vapor.

Vamos agora analisar o gráfico de $\dot{W}_{específica}$ por rc demonstrado na Figura 5.8:

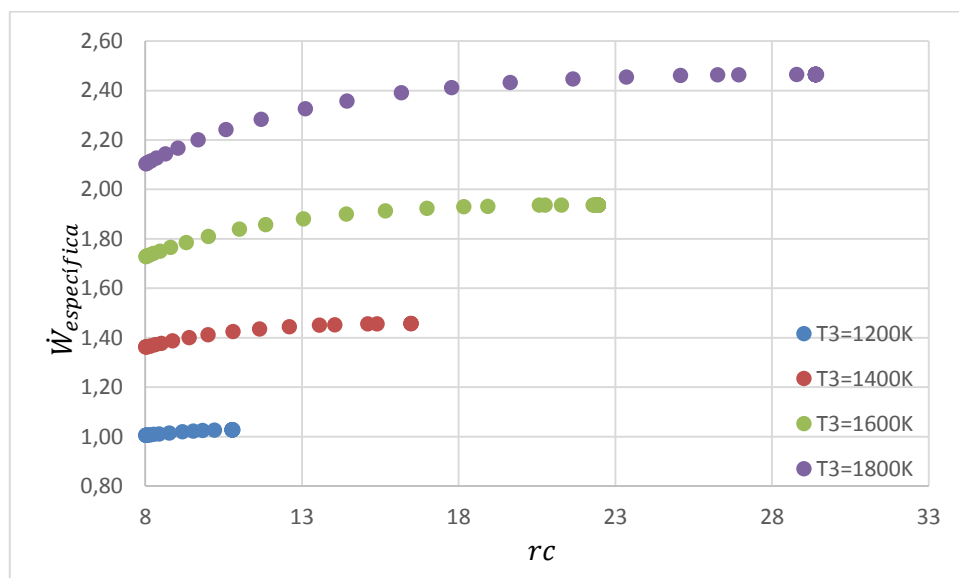


Figura 5.8 – $\dot{W}_{específica}$ por rc , para C_8H_{18} com injeção de 5% de vapor.

Conforme observa-se no gráfico da Figura 5.8, confirma-se o que havia sido mencionado anteriormente, na análise sem otimização, sobre o fato de que quanto maior T_3 , maior a potência específica e a razão de compressão para uma $\dot{W}_{específica}$ ótima.

Destacando-se $T_3=1600K$, e concentrando-se no intervalo de rc de 13 a 18, observa-se um ganho de potência em torno de 2 a 3%. Analisando esses dados sob uma visão econômica, deve-se frisar que esse ganho deve ser avaliado com cuidado. Por este motivo deve-se analisar, dependendo do uso da turbina (horas de funcionamento), custo do combustível, demanda da potência e valor do equipamento se o investimento adicional para um compressor com maior razão de compressão seria viável economicamente.

Esta análise foi feita para um intervalo particular, mas, da mesma forma, pode ser realizada para diferentes temperaturas e diferentes razões de compressão.

As análises feitas pelos gráficos do tópico “a”, para o C_8H_{18} e 5% de vapor, se repetem para os demais gráficos mostrados a seguir, onde se tem diferentes porcentagens de vapor na entrada da Câmara de Combustão.

b) Otimização de $\dot{W}_{específica}$ para C_8H_{18} com injeção de 4% de vapor:

A Figura 5.9. nos mostra que a otimização foi realizada adequadamente para as quatro temperaturas testadas.

Podemos observar que entre as Figuras 5.8 e 5.10, com a diminuição da porcentagem do vapor injetado, as razões de compressão ótimas para cada temperatura e a $\dot{W}_{específica}$ ótima diminuíram.

Também nota-se que quanto maior T_3 , maior a potência específica e maior a razão de compressão para uma $\dot{W}_{específica}$ ótima.

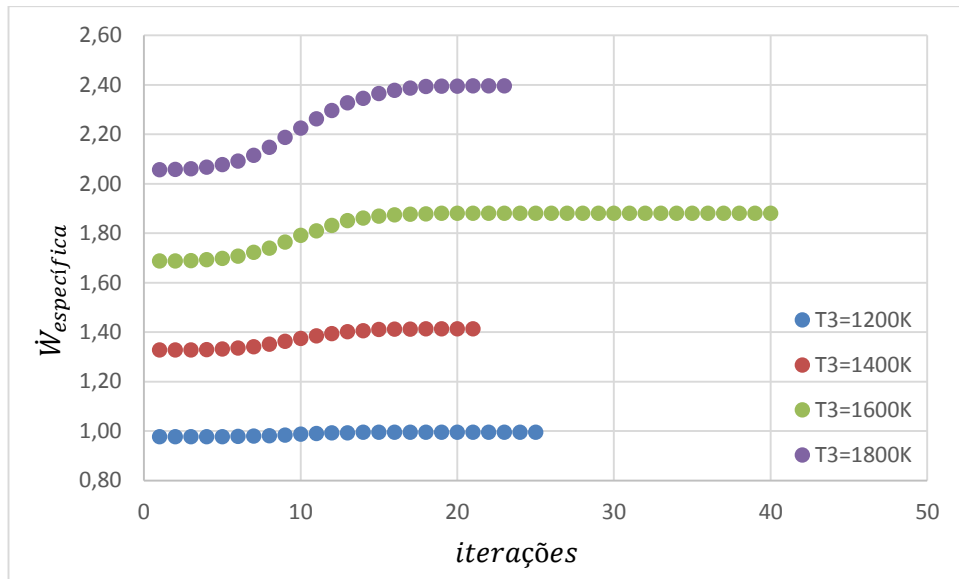


Figura 5.9 – $\dot{W}_{específica}$ por iterações, para C_8H_{18} com injeção de 4% de vapor.

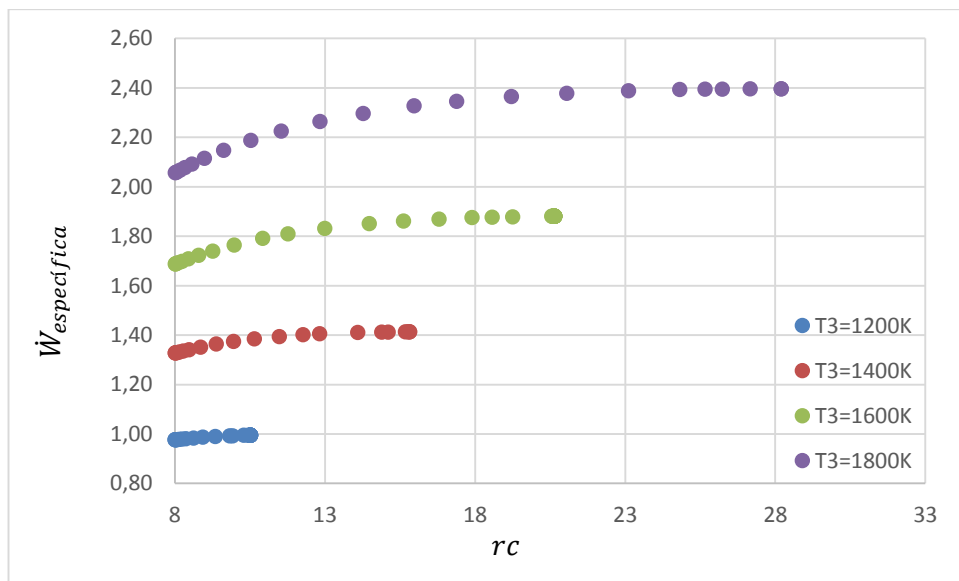


Figura 5.10 – $\dot{W}_{específica}$ por rc , para C_8H_{18} com injeção de 4% de vapor.

c) Otimização de $\dot{W}_{específica}$ para C_8H_{18} com injeção de 3% de vapor:

A Figura 5.11 nos mostra que a otimização ocorreu corretamente, enquanto a Figura 5.12 nos remete a uma continuação de diminuição das razões de compressão ótimas para cada temperatura e da $\dot{W}_{específica}$ ótima, comparado com porcentagens maiores de vapor injetado.

Nesta situação observa-se que, para um aumento de T_3 , a potência específica e a razão de compressão para uma $\dot{W}_{específica}$ ótima aumentaram.

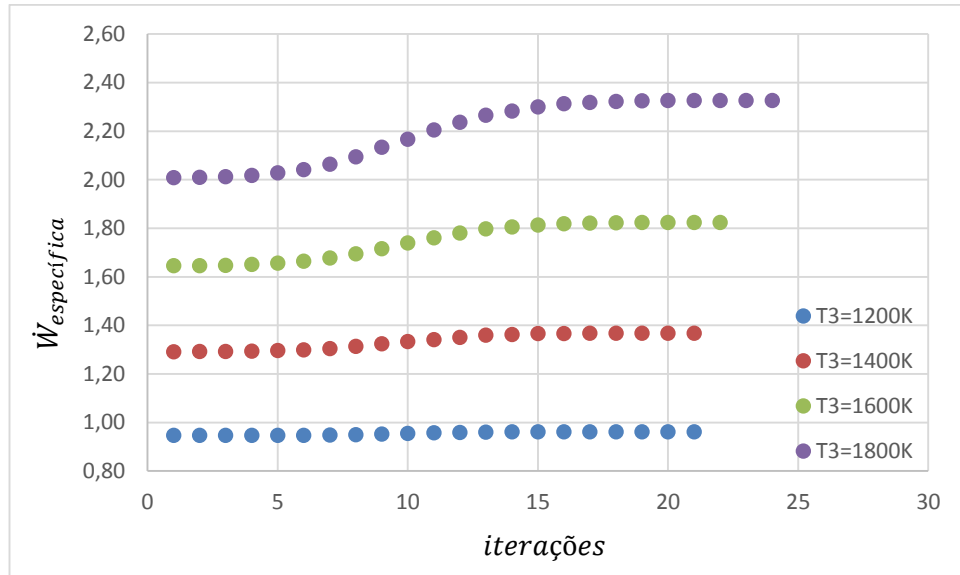


Figura 5.11– $\dot{W}_{específica}$ por *iterações*, para C_8H_{18} com injeção de 3% de vapor.

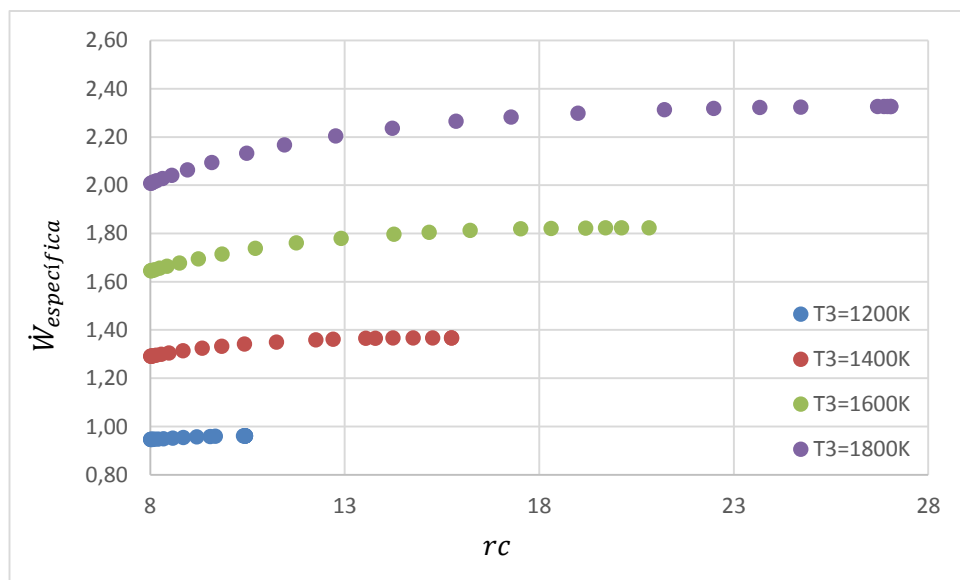


Figura 5.12– $\dot{W}_{específica}$ por rc , para C_8H_{18} com injeção de 3% de vapor.

d) Otimização de $\dot{W}_{específica}$ para C_8H_{18} com injeção de 2% de vapor:

Pela Figura 5.13 observamos que a otimização é realizada com sucesso.

A Figura 5.14 demonstra, novamente, uma diminuição de razão de compressão e da $\dot{W}_{específica}$ ótimas, para cada temperatura, comparando a injeção de 2% e as porcentagens maiores de injeção de vapor saturado mencionadas em “a”, “b” e “c”

Também pode-se notar que quanto maior T_3 , maior a potência específica e maior a razão de compressão para uma $\dot{W}_{específica}$ ótima.

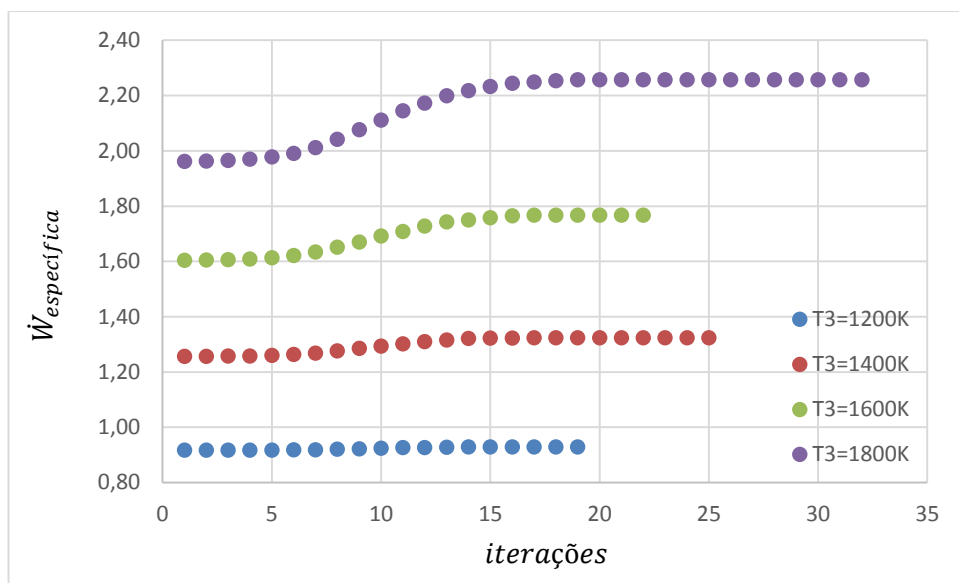


Figura 5.13– $\dot{W}_{específica}$ por iterações, para C_8H_{18} com injeção de 2% de vapor.

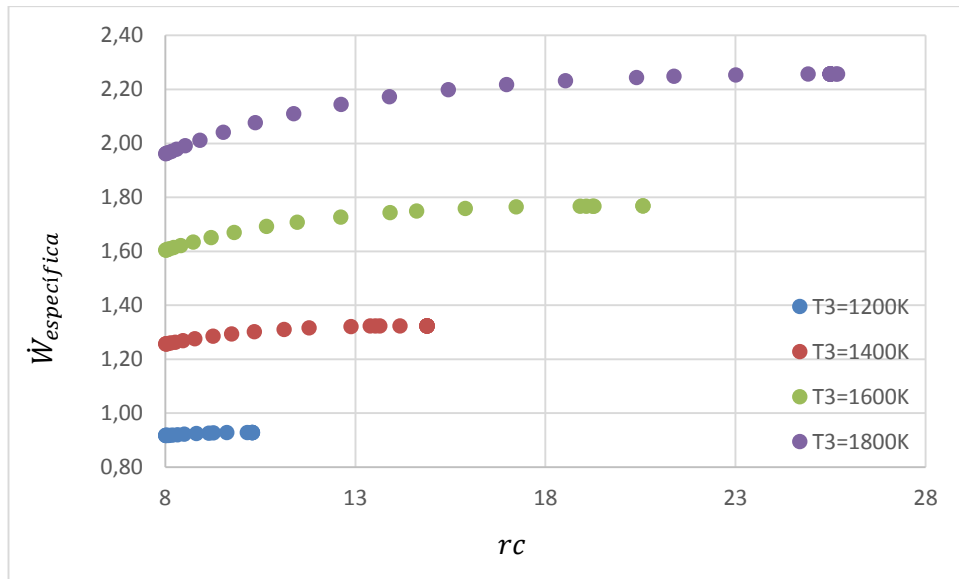


Figura 5.14– $\dot{W}_{específica}$ por rc , para C_8H_{18} com injeção de 2% de vapor.

e) Otimização de $\dot{W}_{específica}$ para C_8H_{18} com injeção de 1% de vapor:

A Figura 5.15 nos remete a uma otimização realizada de forma correta. Para a Figura 5.16, assim como os demais gráficos de $\dot{W}_{específica}$ por rc , nos faz concluir que quanto menor a porcentagem de vapor injetado, menor a $\dot{W}_{específica}$ e a razão de compressão para uma $\dot{W}_{específica}$ ótima. Desta forma, o caso de injeção de 1% de vapor saturado foi o que apresentou as menores $\dot{W}_{específica}$ e razão de compressão ótimas.

Também concluímos que quanto maior T_3 , maior a potência específica e maior a razão de compressão para uma $\dot{W}_{específica}$ ótima.

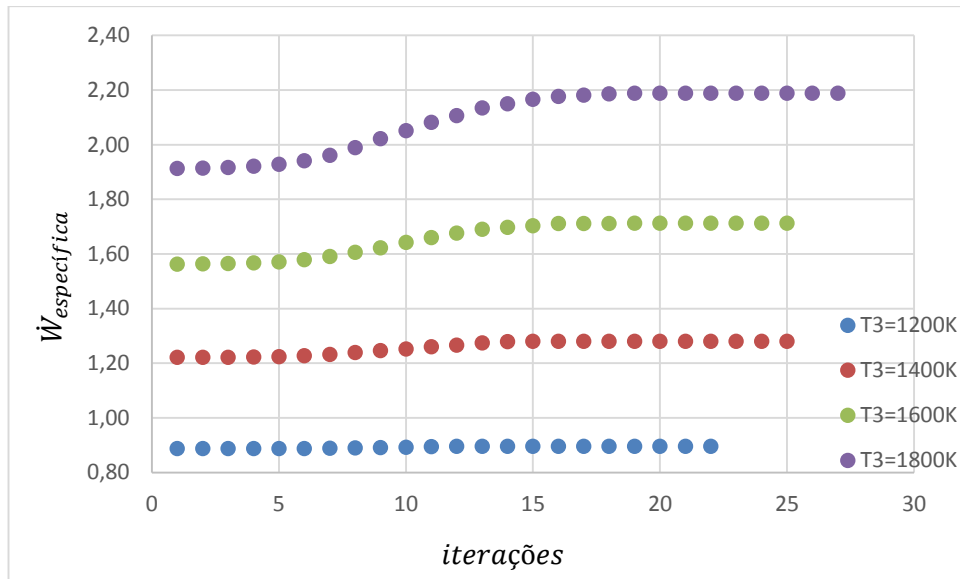


Figura 5.15– $\dot{W}_{especifica}$ por $iterações$, para C_8H_{18} com injeção de 1% de vapor.

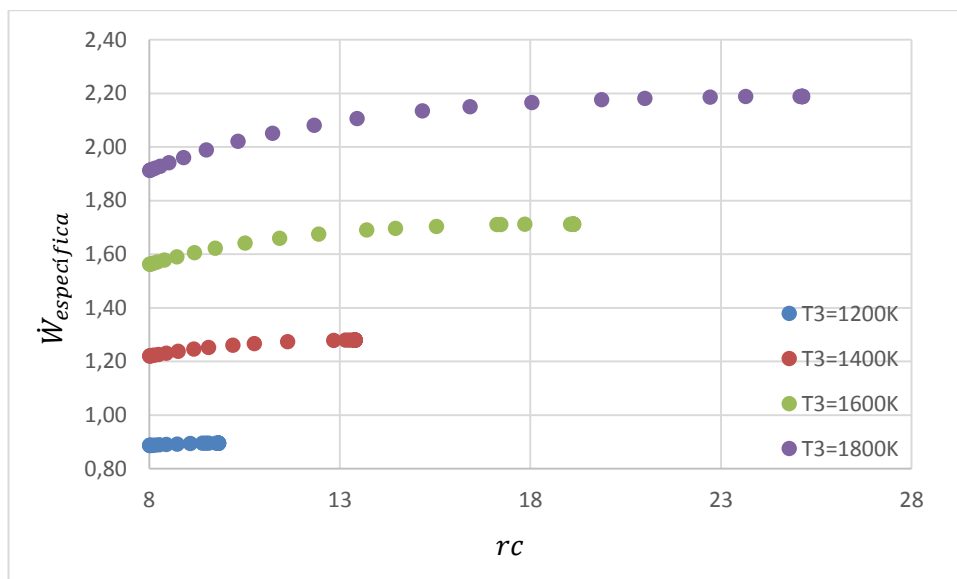


Figura 5.16– $\dot{W}_{especifica}$ por rc , para C_8H_{18} com injeção de 1% de vapor.

f) Otimização de η_{th} para C_8H_{18} com injeção de 5% de água e $T_3 = 1800K$:

Para a otimização do rendimento, Figuras 5.17 e 5.18, deve-se fazer uma importante observação. Como existem turbinas com razões de compressão levemente superiores a 40, foi imposto no programa que o loop finalizasse quando o mesmo

alcançasse rc maior ou igual a 50. Então, apesar de o programa tentar fazer a otimização, para os casos de T_3 igual a 1400, 1600 e 1800K, a razão de compressão ótima é acima de 50 e, por esse motivo não foi encontrado o valor máximo da eficiência nos referidos casos.

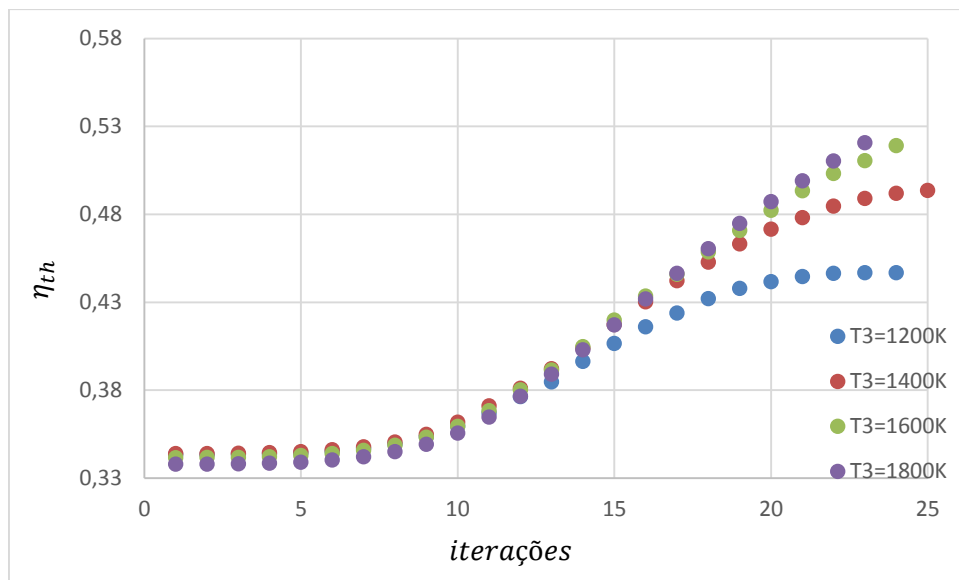


Figura 5.17— η_{th} por $iterações$, para C_8H_{18} com injeção de 5% de vapor.

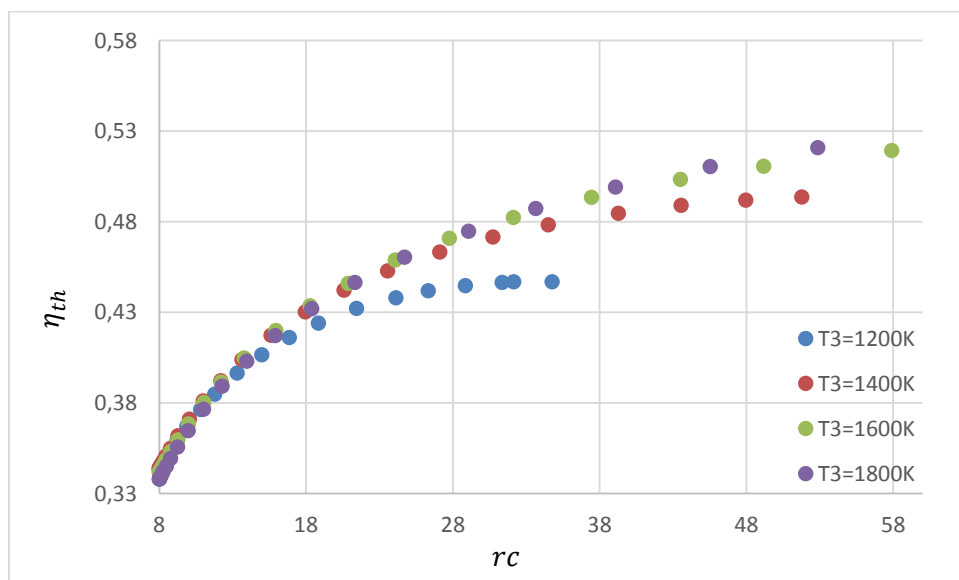


Figura 5.18 - η_{th} por rc , para C_8H_{18} com injeção de 5% de vapor

5.4. COMPARAÇÃO ENTRE AS PORCENTAGENS DE VAPOR ABORDADAS

As Figuras 5.19 e 5.20 retratam a contribuição da quantidade de vapor para o aumento da potência específica e do rendimento, respectivamente. Eles foram feitos otimizando a $\dot{W}_{específica}$ e, em seguida, o η_{th} , baseando-se no exemplo de C_8H_{18} para $T_3 = 1800K$.

Pela Figura 5.19 presenciamos um ganho de potência específica em torno de 12% entre a menor e a maior porcentagem, então pode-se observar que quanto maior a porcentagem de vapor injetado, maior a potência específica e maior a razão de compressão relativa à potência específica ótima.

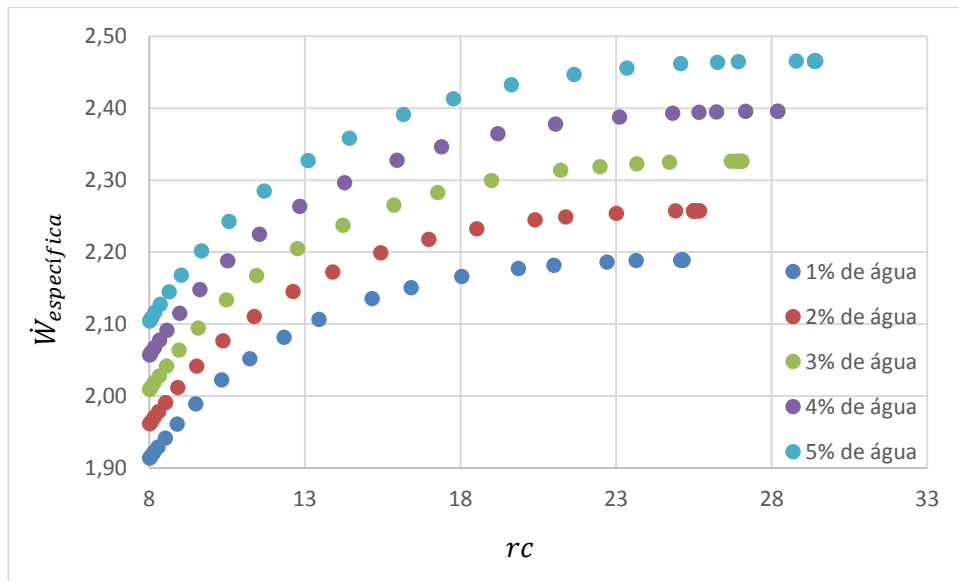


Figura 5.19 – $\dot{W}_{específica}$ por rc para diferentes porcentagens de vapor.

Pela Figura 5.20 conclui-se que, para maiores porcentagens de vapor, obteve-se maiores eficiências, havendo um ganho entre a menor e a maior porcentagem em torno de 4% no último loop de otimização. Contudo, pode-se notar que para baixas razões de compressão essa diferença é mínima. Além disso, como $T_3 = 1800K$ neste exemplo,

deve-se lembrar que a otimização não alcançou os valores de rendimento ótimo, como havia sido explicado anteriormente.

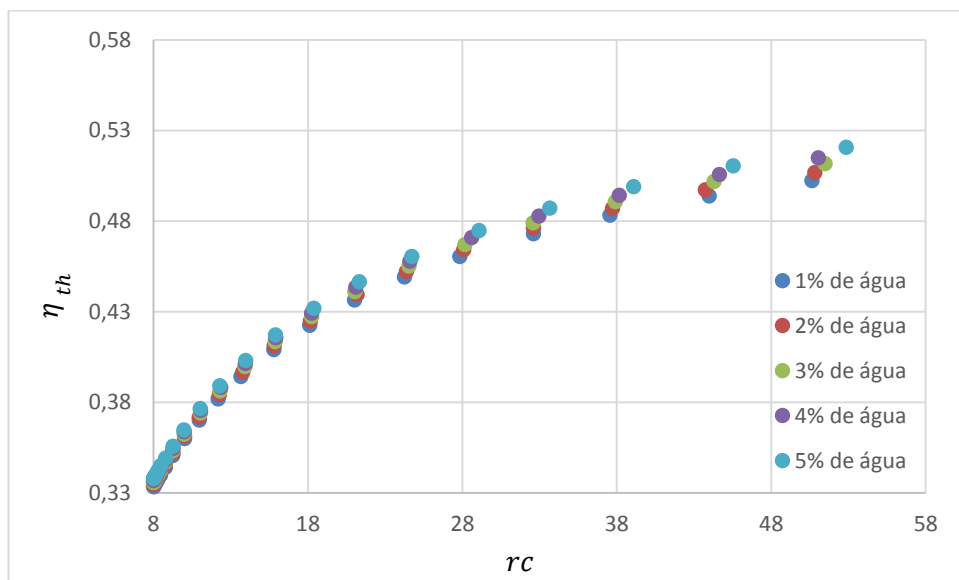


Figura 5.20 – η_{th} por rc para diferentes porcentagens de vapor.

Deve-se considerar que, dependendo da razão de compressão que a Turbina trabalha e dos custos para o tratamento de água (purificação e desmineralização), além do custo e do benefício energético adquirido, pode ser que não seja economicamente interessante um ciclo de Turbina a Gás com injeção de vapor. Por outro lado, se a quantidade de horas de uso da Turbina e a rc forem altos o suficiente, então o método da injeção de vapor provavelmente trará um benefício econômico.

5.5. ANÁLISE PARA OS DEMAIS COMBUSTÍVEIS CITADOS

5.5.1. PARA CH_4 (METANO)

Veremos a seguir que os gráficos para CH_4 possuem o mesmo comportamento que os gráficos elaborados para C_8H_{18} .

a) Otimização de $\dot{W}_{específica}$ para CH_4 com injeção de 5% de vapor:

Observa-se pela Figura 5.21 que os quatro casos de temperaturas de entrada da Turbina foram otimizados adequadamente, com maximização da potência específica ao longo das iterações.

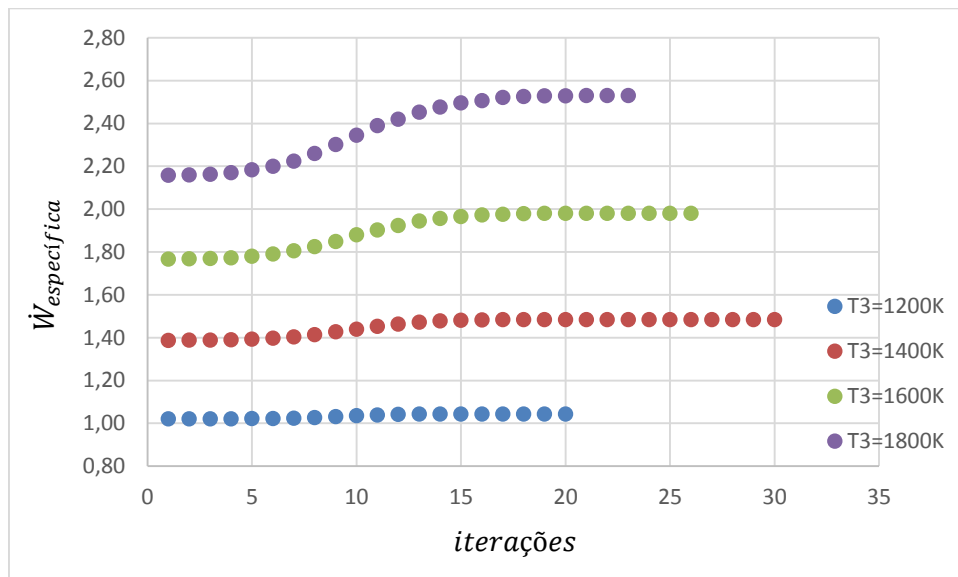


Figura 5.21– $\dot{W}_{específica}$ por iterações, para CH_4 com entrada de 5% de vapor.

Assim como o C_8H_{18} , pelo gráfico da Figura 5.22, pode-se observar que o aumento de T_3 influencia em maiores $\dot{W}_{específica}$ e razão de compressão para uma $\dot{W}_{específica}$ ótima.

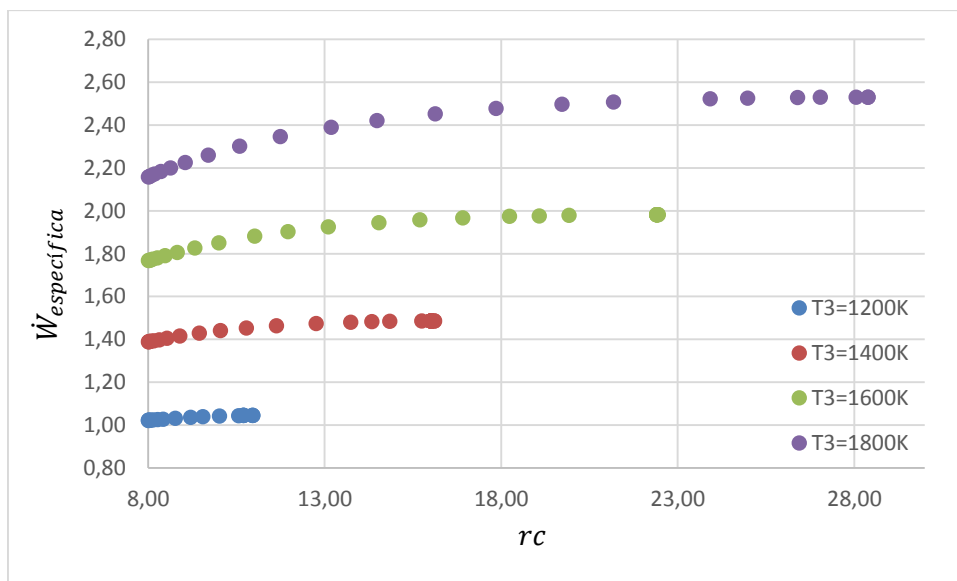


Figura 5.22 - $\dot{W}_{especifica}$ por rc , para CH_4 com entrada de 5% de vapor.

b) Otimização de $\dot{W}_{especifica}$ para CH_4 com injeção de 4% de vapor:

Conforme a Figura 5.23 a otimização foi realizada corretamente para as quatro temperaturas testadas.

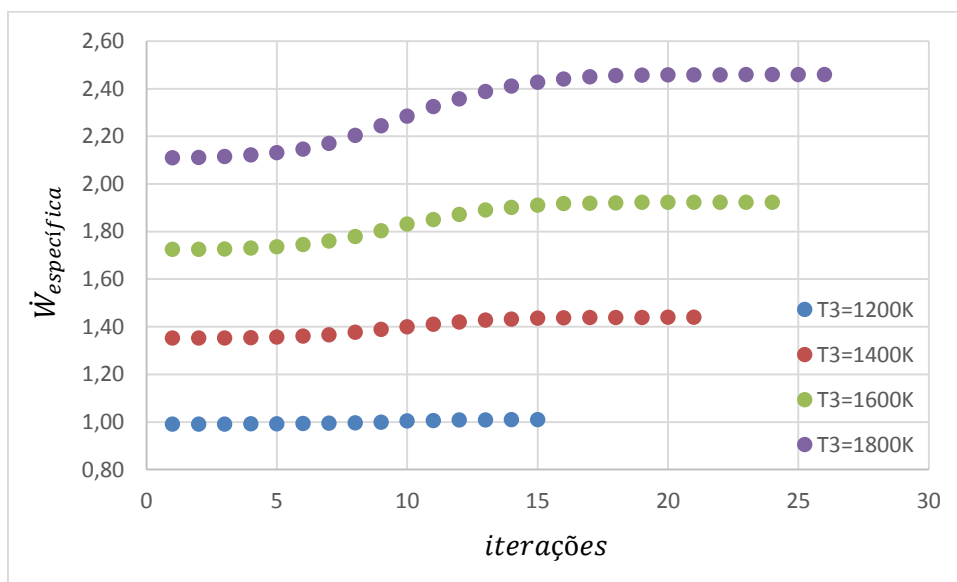


Figura 5.23 - $\dot{W}_{especifica}$ por $iterações$, para CH_4 com injeção de 4% de vapor.

Podemos observar que, entre os gráficos de $\dot{W}_{específica}$ por rc para 4% (Figura 5.24) e 5% de injeção de vapor, devido ao fato de ter ocorrido uma diminuição da porcentagem de injeção, as razões de compressão ótimas para cada temperatura e a $\dot{W}_{específica}$ ótima diminuíram.

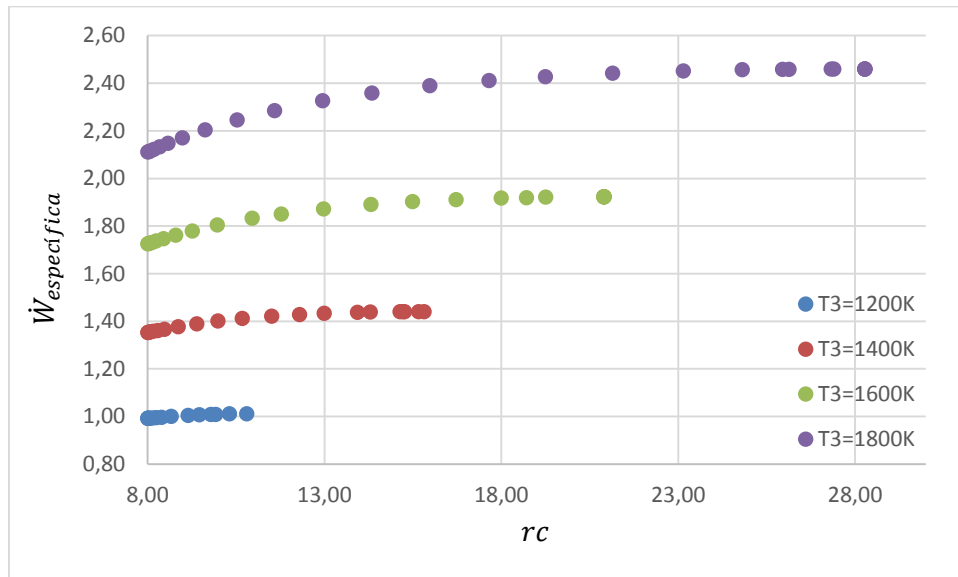


Figura 5.24 - $\dot{W}_{específica}$ por rc , para CH_4 com injeção de 4% de vapor.

Também nota-se que quanto maior T_3 , maior a potência específica e maior a razão de compressão para uma $\dot{W}_{específica}$ ótima.

c) Otimização de $\dot{W}_{específica}$ para CH_4 com injeção de 3% de vapor:

A Figura 5.25 nos mostra que a otimização ocorreu com sucesso, enquanto que Figura 5.26 demonstra que, comparado com porcentagens maiores de vapor injetado, uma continuação de diminuição das razões de compressão ótimas para cada temperatura e da $\dot{W}_{específica}$ ótima.

Novamente podemos observar que a medida que T_3 aumenta, maiores são a potência específica e a razão de compressão para uma $\dot{W}_{específica}$ ótima.

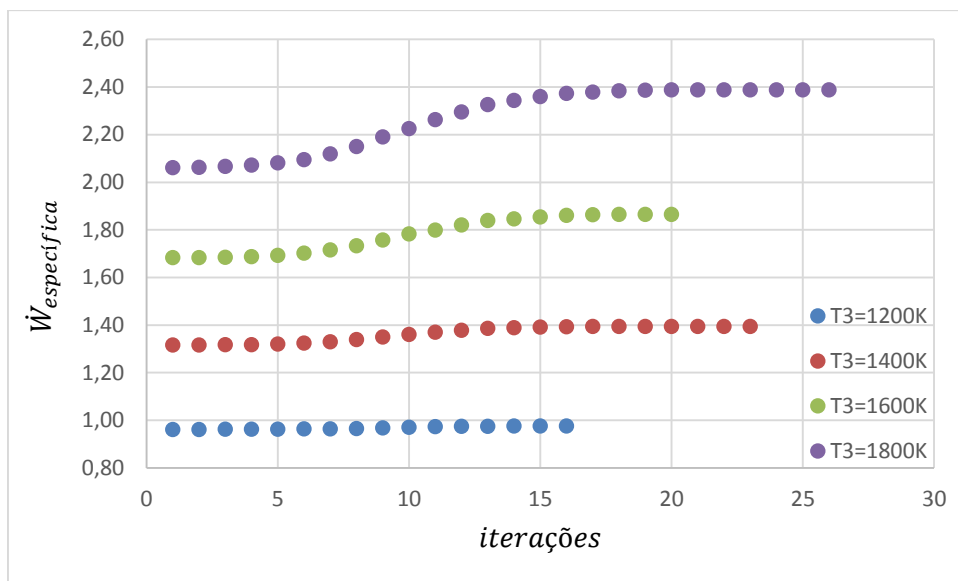


Figura 5.25– $\dot{W}_{especifica}$ por *iterações*, para CH_4 com injeção de 3% de vapor.

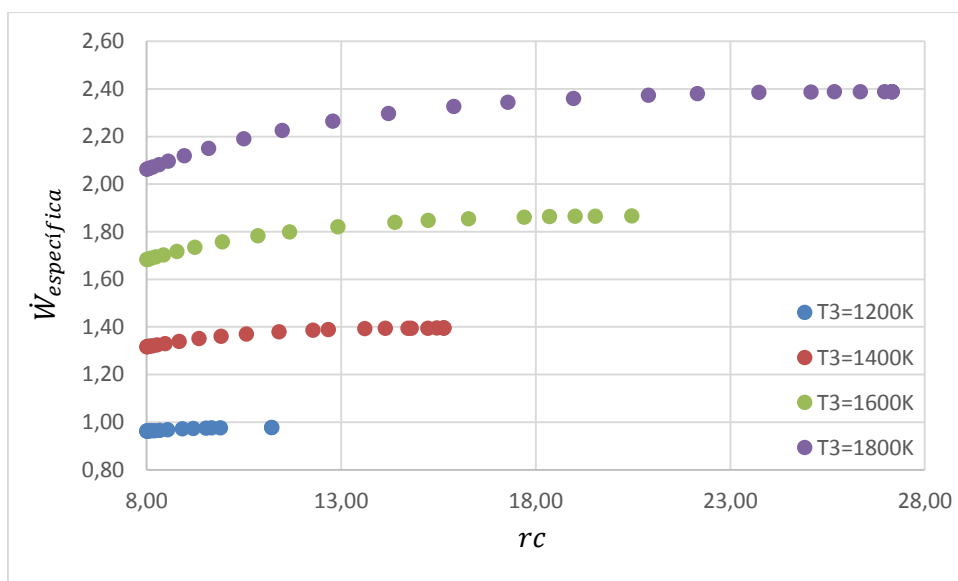


Figura 5.26– $\dot{W}_{especifica}$ por *rc*, para CH_4 com injeção de 3% de vapor.

d) Otimização de $\dot{W}_{especifica}$ para CH_4 com entrada de 2% de vapor:

Através da Figura 5.27 observamos a otimização sendo realizada adequadamente.

A Figura 5.28 nos faz notar, assim como os demais casos, uma diminuição da razão de compressão e da $\dot{W}_{especifica}$ ótimas, para cada temperatura, comparando esta

porcentagem de injeção de vapor saturado e as porcentagens maiores mencionadas anteriormente.

Também pode-se notar que quanto maior T_3 , maior a potência específica e maior a razão de compressão para uma $\dot{W}_{específica}$ ótima.

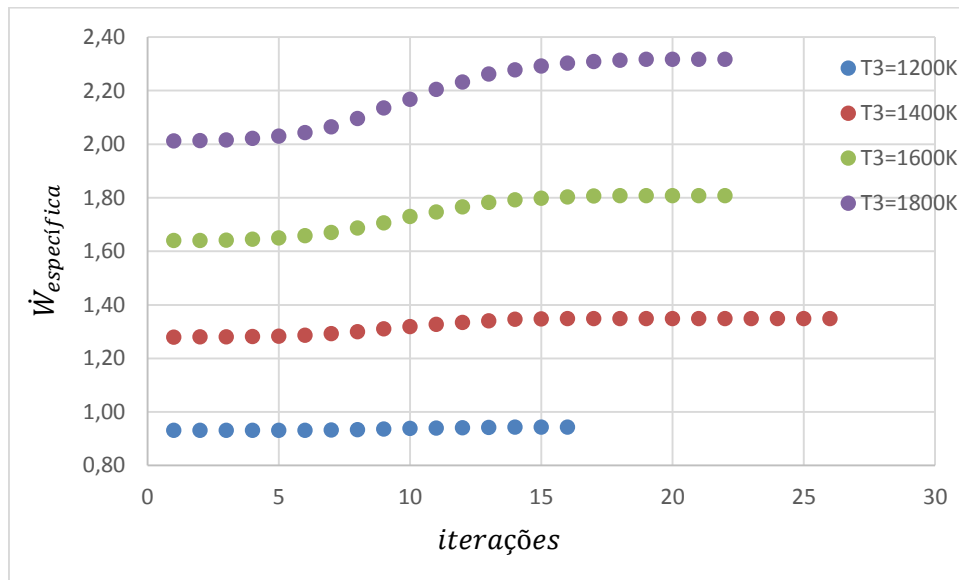


Figura 5.27– $\dot{W}_{específica}$ por iterações, para CH_4 com injeção de 2% de vapor.

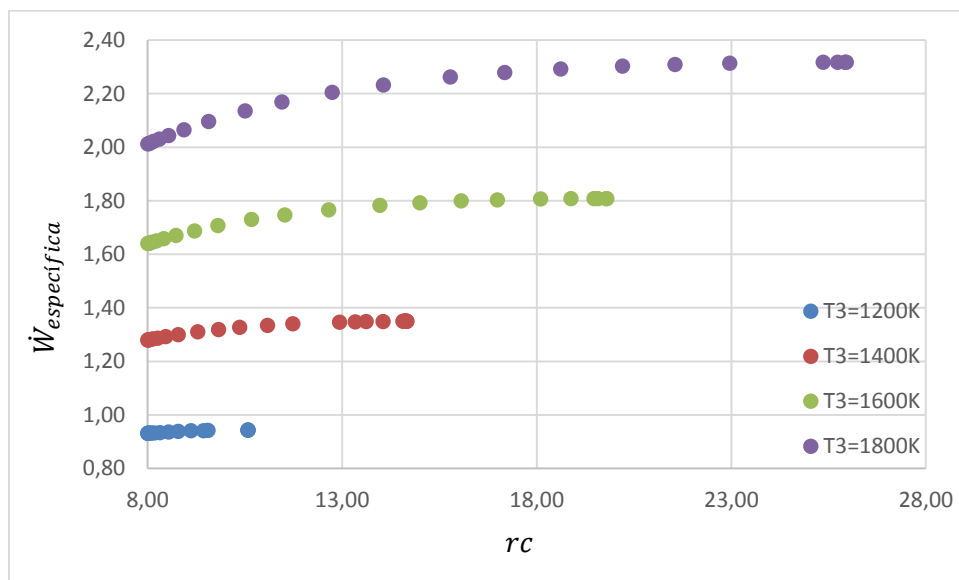


Figura 5.28– $\dot{W}_{específica}$ por rc , para CH_4 com injeção de 2% de vapor.

e) Otimização de $\dot{W}_{específica}$ para CH_4 com injeção de 1% de vapor:

A Figura 5.29 nos leva a uma otimização realizada corretamente, ao passo que a Figura 5.30, assim como os gráficos de $\dot{W}_{específica}$ por rc com injeção de 5, 4, 3 e 2% de vapor, nos faz concluir que a medida que a porcentagem de vapor injetado diminui, menor serão a $\dot{W}_{específica}$ e a razão de compressão para uma $\dot{W}_{específica}$ ótima. Então, novamente, o caso de injeção de 1% de vapor saturado foi o que apresentou as menores $\dot{W}_{específica}$ e razão de compressão ótimas, comparado com outras porcentagens de vapor.

Também concluiu-se que o aumento de T_3 reflete em maiores potência específica e maior a razão de compressão para uma $\dot{W}_{específica}$ ótima.

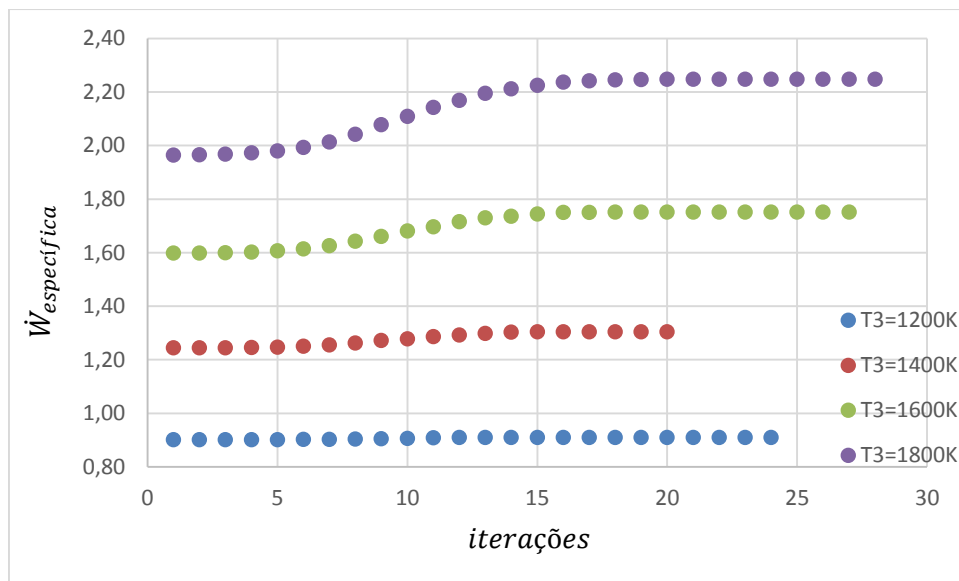


Figura 5.29– $\dot{W}_{específica}$ por iterações, para CH_4 com injeção de 1% de vapor.

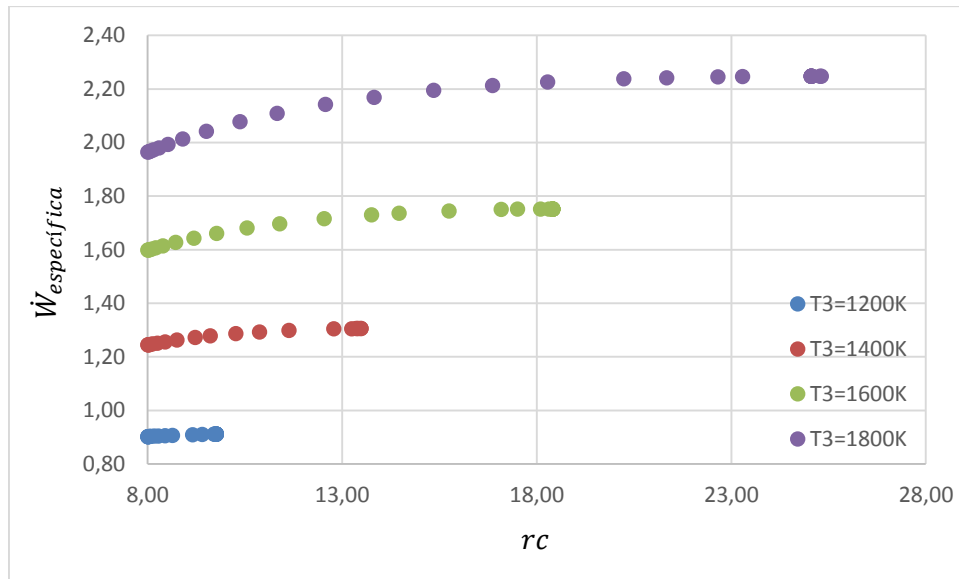


Figura 5.30– $\dot{W}_{especifica}$ por rc , para CH_4 com injeção de 1% de vapor.

f) Otimização de η_{th} para CH_4 com injeção de 5% de vapor e $T_3 = 1800K$:

Assim como no caso do combustível anteriormente tratado, para a otimização do rendimento térmico do ciclo, Figuras 5.31 e 5.32, deve-se fazer a mesma observação de que, por existirem turbinas com razões de compressão maiores 40, impôs-se na linguagem do programa que a otimização se finalizasse quando se alcançasse uma razão de compressão maior ou igual a 50. Então, o programa tenta fazer a otimização, mas para os casos de T_3 igual a 1400, 1600 e 1800K. No entanto, como a razão de compressão ótima é acima de 50 e, com isso, no caso deste combustível, também não foi encontrado o valor máximo da eficiência para estas temperaturas.

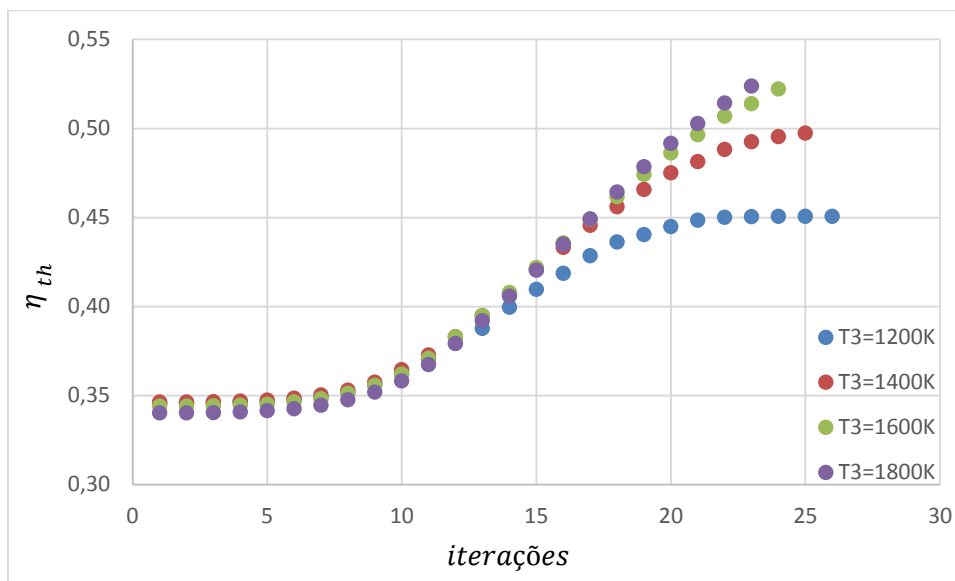


Figura 5.31– η_{th} por *iterações*, para CH_4 com injeção de 5% de vapor.

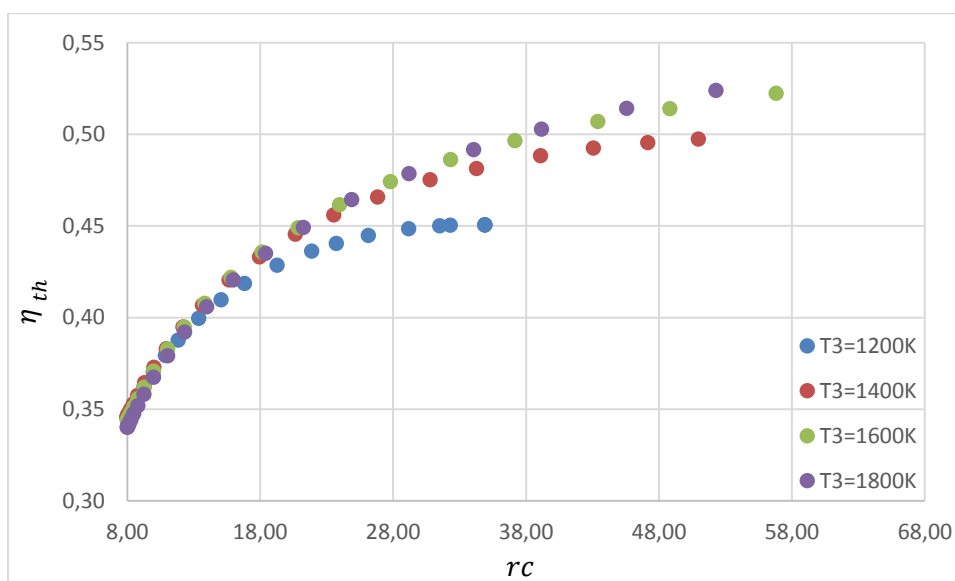


Figura 5.32– η_{th} por *rc*, para CH_4 com injeção de 5% de vapor.

Com tais gráficos, podemos constatar que CH_4 obedece o mesmo comportamento que os gráficos de C_8H_{18} .

5.5.2. PARA $C_{14}H_{30}$ (DIESEL)

Faremos agora uma análise do $C_{14}H_{30}$ (Diesel), que sucede da mesma forma que os outros dois combustíveis.

a) Otimização de $\dot{W}_{específica}$ para $C_{14}H_{30}$ com injeção de 5% de vapor:

Observa-se pela Figura 5.33 que otimizou-se corretamente a potência específica para os quatro casos de temperaturas de entrada da turbina, pois podemos observar um aumento da função objetivo durante as iterações.

Como demonstrado na Figura 5.34, assim como nos casos dos combustíveis anteriormente tratados, o gráfico nos leva a notar que a medida que T_3 aumenta, maiores são a $\dot{W}_{específica}$ e a razão de compressão para uma $\dot{W}_{específica}$ ótima.

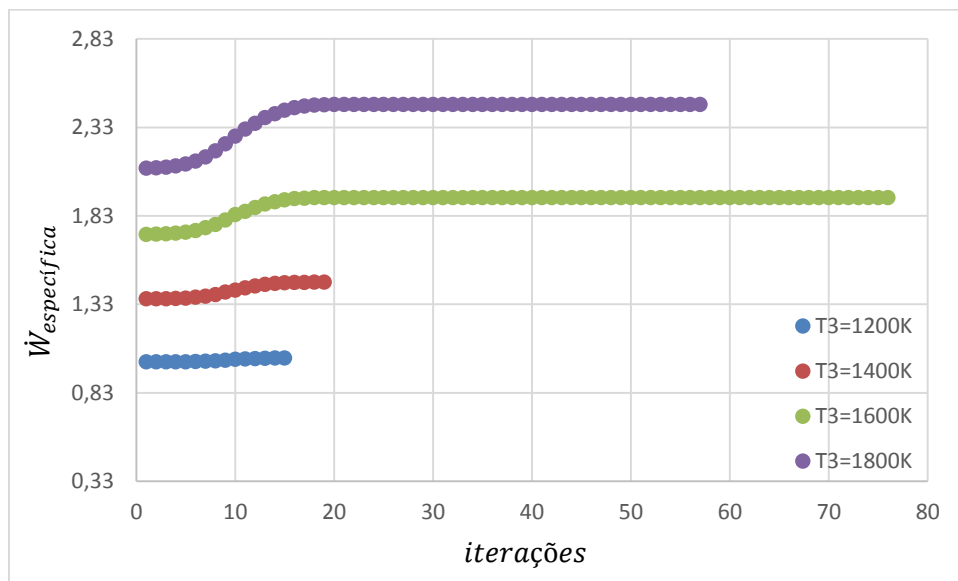


Figura 5.33– $\dot{W}_{específica}$ por iterações, para $C_{14}H_{30}$ com injeção de 5% de vapor.

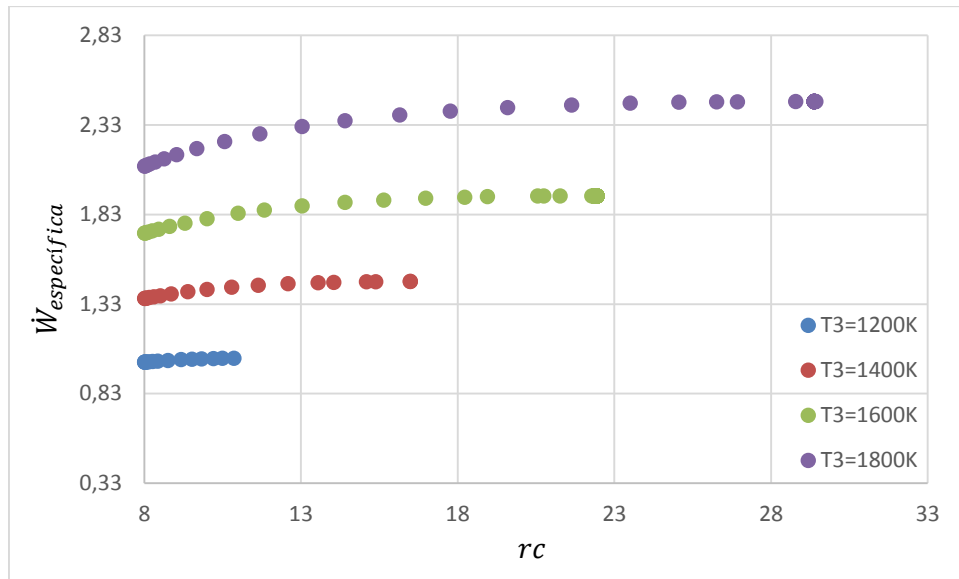


Figura 5.34– $\dot{W}_{especifica}$ por rc , para $C_{14}H_{30}$ com injeção de 5% de vapor.

b) Otimização de $\dot{W}_{especifica}$ para $C_{14}H_{30}$ com injeção de 4% de água:

A Figura 5.35 nos mostra que a otimização foi realizada com sucesso para os quatro casos de temperaturas testadas.

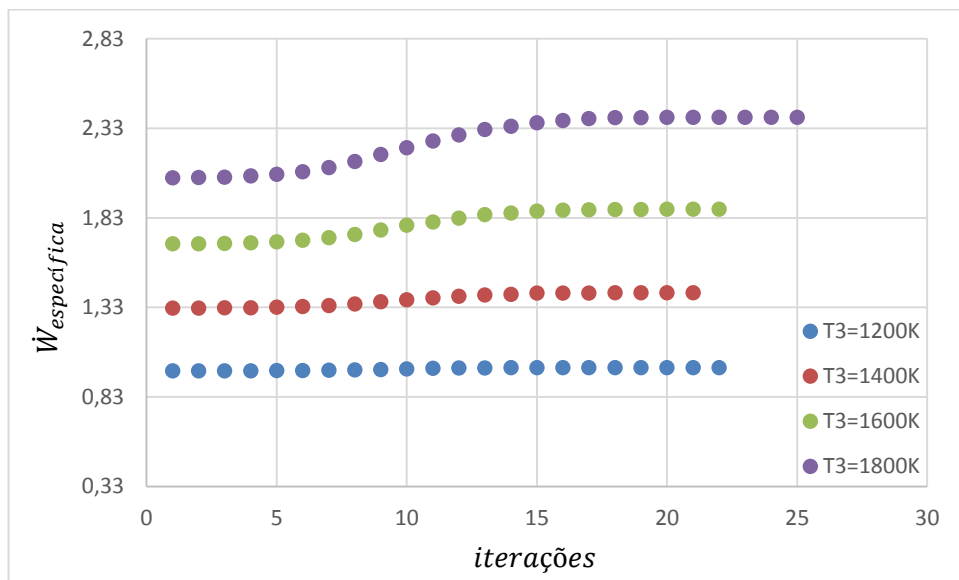


Figura 5.35– $\dot{W}_{especifica}$ por $iterações$, para $C_{14}H_{30}$ com injeção de 4% de vapor.

Assim como os outros dois combustíveis abordados anteriormente, podemos observar que, entre as Figuras 5.34 e 5.36, como houve uma diminuição da porcentagem do vapor injetado, presencia-se uma diminuição da razão de compressão e da $\dot{W}_{específica}$ ótimas para cada temperatura.

Também pode-se observar que, conforme T_3 aumenta, também existe um aumento da potência específica e da razão de compressão para uma $\dot{W}_{específica}$ ótima.

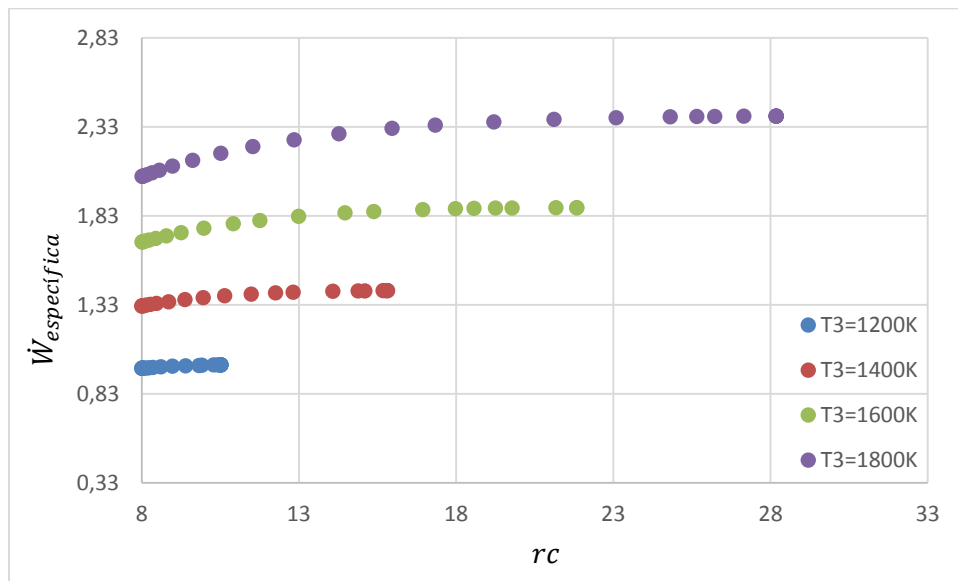


Figura 5.36– $\dot{W}_{específica}$ por rc , para $C_{14}H_{30}$ com injeção de 4% de vapor.

c) Otimização de $\dot{W}_{específica}$ para $C_{14}H_{30}$ com injeção de 3% de água:

A Figura 5.37 nos mostra que a otimização ocorreu de forma adequada, enquanto que a Figura 5.38, comparado com porcentagens maiores de vapor injetado mencionadas, nos leva a perceber uma progressão de diminuição das razões de compressão ótimas para cada temperatura e da $\dot{W}_{específica}$ ótima.

Nota-se, também, que quanto maior for T_3 , maior a potência específica e maior a razão de compressão para uma $\dot{W}_{específica}$ ótima.

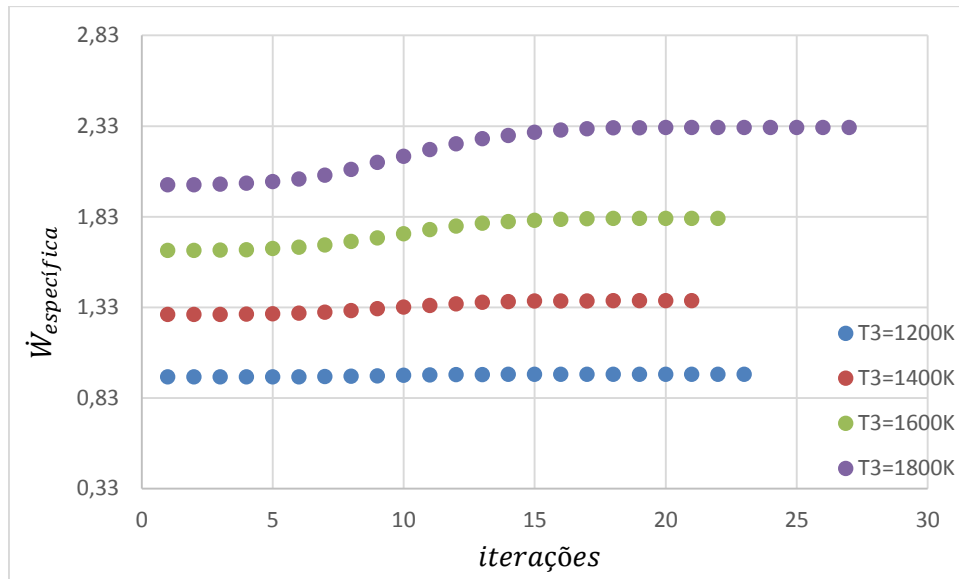


Figura 5.37– $\dot{W}_{especifica}$ por iterações, para $C_{14}H_{30}$ com injeção de 3% de vapor.

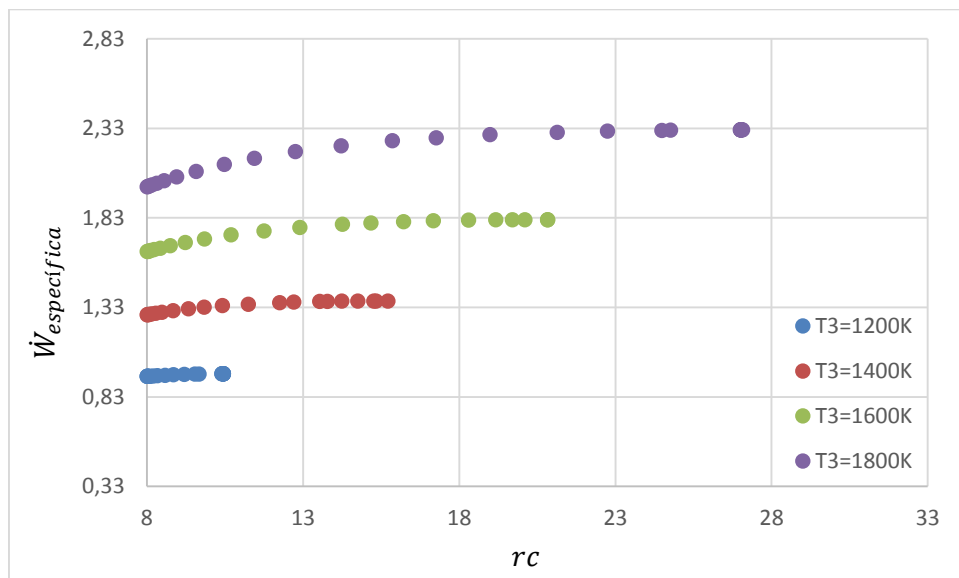


Figura 5.38– $\dot{W}_{especifica}$ por rc , para $C_{14}H_{30}$ com injeção de 3% de vapor.

d) Otimização de $\dot{W}_{especifica}$ para $C_{14}H_{30}$ com injeção de 2% de água:

Pode-se observar pela Figura 5.39 que a otimização foi realizada corretamente, com aumento da função objetivo durante as iterações, enquanto que a Figura 5.40 nos faz observar, novamente, uma diminuição de razão de compressão e da $\dot{W}_{especifica}$

ótimas para cada temperatura, comparando a injeção de 2% de vapor saturado e as porcentagens maiores de injeção mencionadas anteriormente.

Novamente observa-se que o aumento de T_3 , provoca um aumento na potência específica e maior a razão de compressão para uma $\dot{W}_{específica}$ ótima.

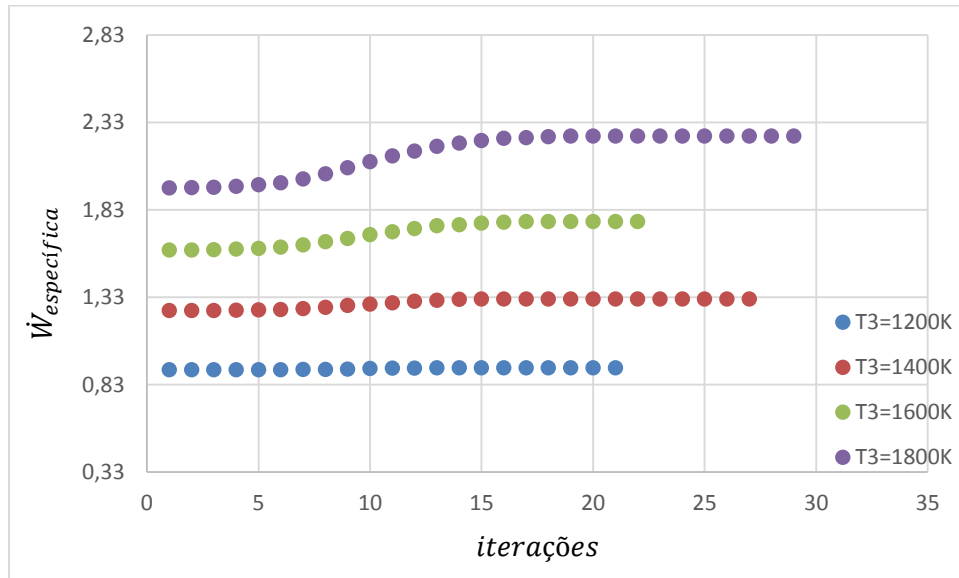


Figura 5.39— $\dot{W}_{específica}$ por *iterações*, para $C_{14}H_{30}$ com injeção de 2% de vapor.

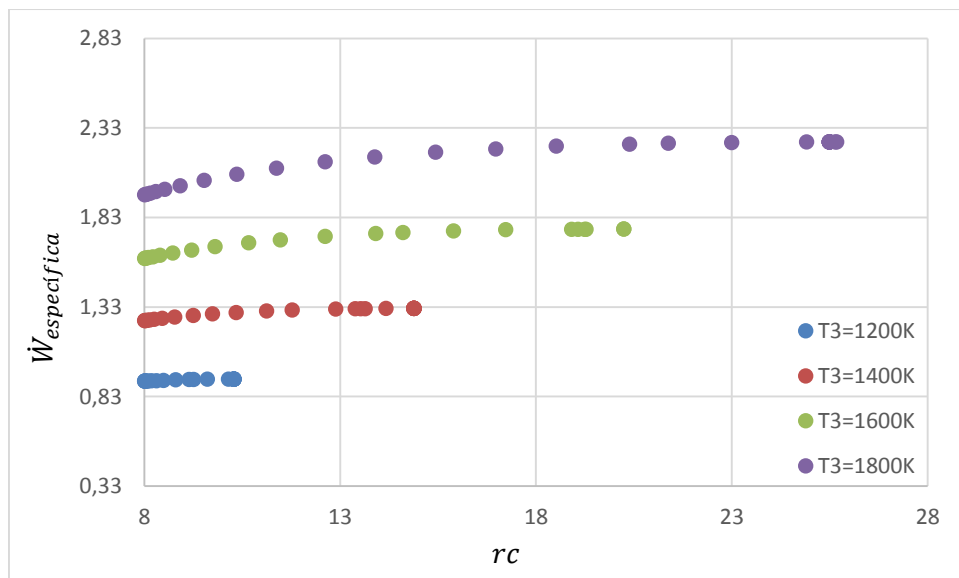


Figura 5.40— $\dot{W}_{específica}$ por rc , para $C_{14}H_{30}$ com injeção de 2% de vapor.

e) Otimização de $\dot{W}_{específica}$ para $C_{14}H_{30}$ com injeção de 1% de água:

A Figura 5.41 nos remete a uma otimização realizada com sucesso, ao passo que a Figura 5.42, assim como os demais gráficos de $\dot{W}_{específica}$ por rc , nos faz concluir que a diminuição da porcentagem de vapor injetado reflete em uma diminuição da $\dot{W}_{específica}$ e da razão de compressão para uma $\dot{W}_{específica}$ ótima. Então, assim como nos casos dos combustíveis tratados anteriormente, o caso de injeção de 1% de vapor saturado foi o que apresentou as menores $\dot{W}_{específica}$ e razão de compressão ótimas.

Também concluiu-se quanto maior T_3 , maior a potência específica e maior a razão de compressão para uma $\dot{W}_{específica}$ ótima.

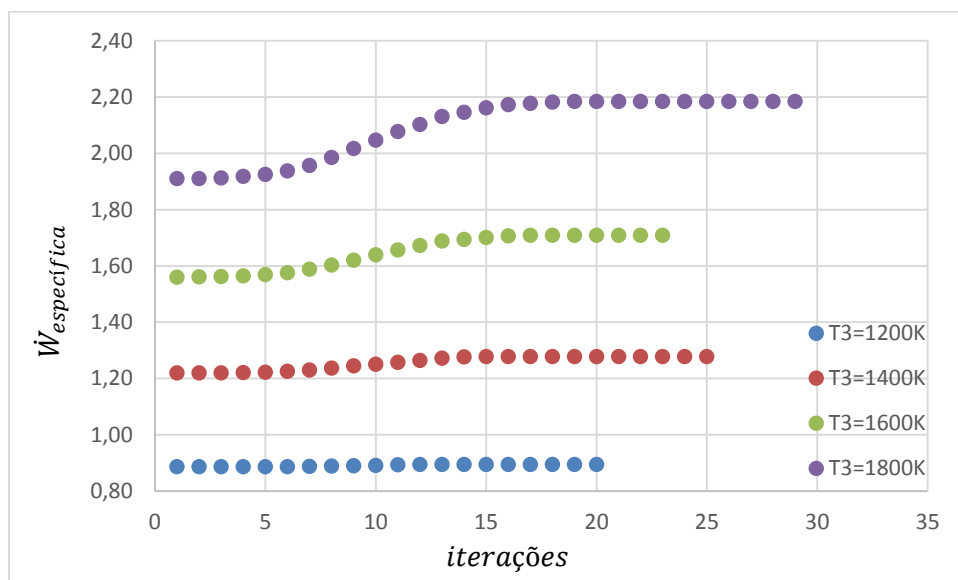


Figura 5.41– $\dot{W}_{específica}$ por iterações, para $C_{14}H_{30}$ com injeção de 1% de vapor.

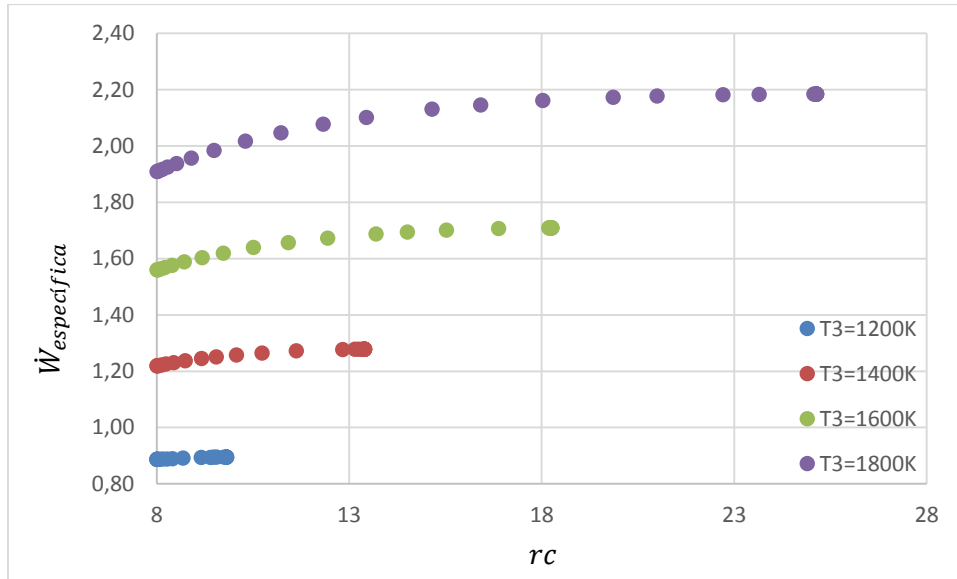


Figura 5.42– $\dot{W}_{especifica}$ por rc , para $C_{14}H_{30}$ com injeção de 1% de vapor.

g) Otimização de η_{th} para $C_{14}H_{30}$ com injeção de 5% de água e $T_3 = 1800K$:

Assim como os outros dois combustíveis tratados anteriormente, deve-se notar pelas Figuras 5.43 e 5.44, que foi imposta na linguagem do programa que a otimização se finalizasse quando o loop alcançasse rc maior ou igual a 50. Então, por mais que o programa tente fazer a otimização, para os casos de T_3 igual a 1400, 1600 e 1800K, a razão de compressão ótima é acima de 50. Desta forma, para o caso do $C_{14}H_{30}$, também não foi encontrado o valor máximo da eficiência para estas temperaturas.

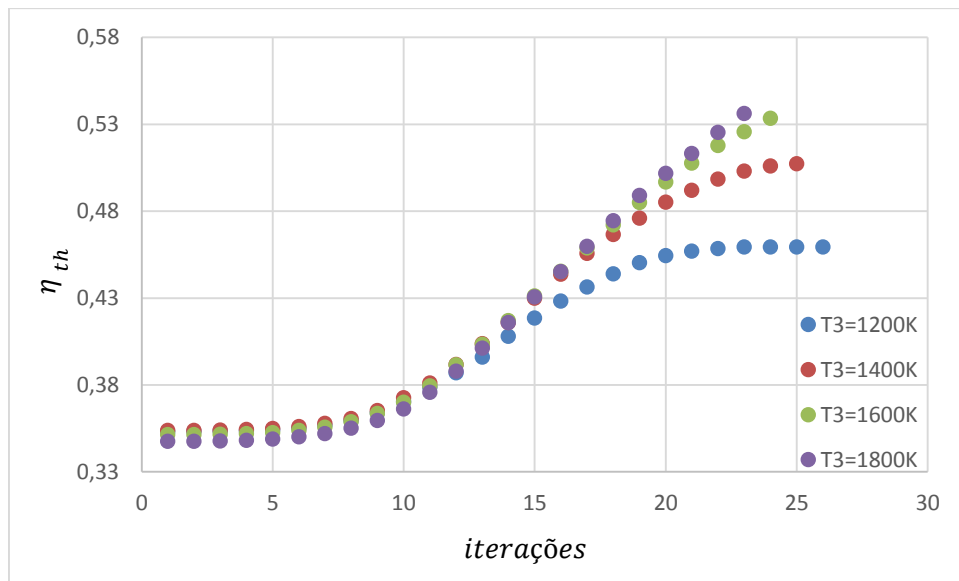


Figura 5.43– η_{th} por *iterações*, para $C_{14}H_{30}$ com injeção de 5% de vapor.

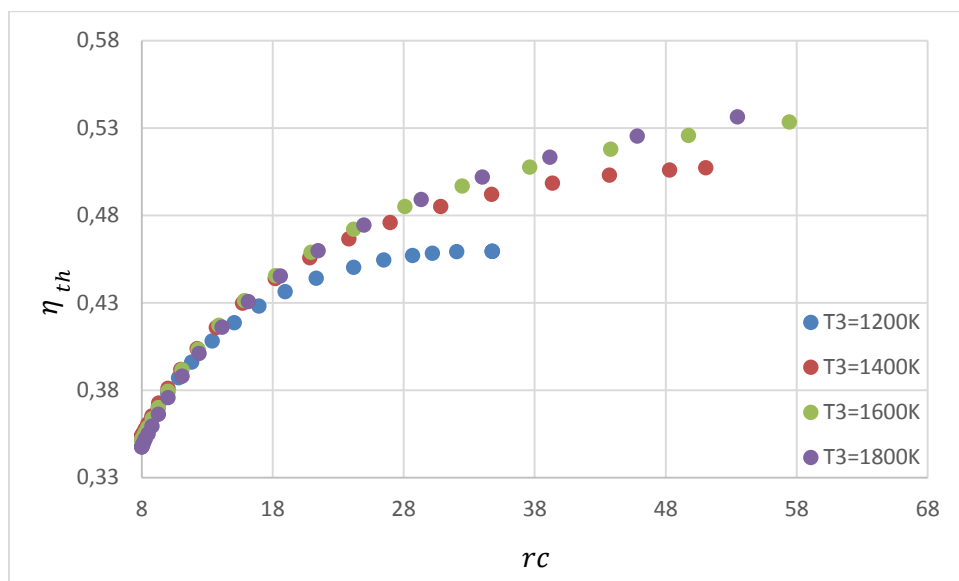


Figura 5.44– η_{th} por *rc*, para $C_{14}H_{30}$ com injeção de 5% de vapor.

5.6. OTIMIZAÇÃO UTILIZANDO VAPOR SUPERAQUECIDO

A seguir faremos uma modificação do vapor saturado seco para vapor superaquecido e uma comparação entre os dois.

Para os testes, foi considerado o caso de injeção de 5% de vapor e $T_3 = 1800K$ e efetuou-se uma alteração na linguagem do programa. Foi mantida a pressão de saída

da bomba e aumentou-se a temperatura, que antes era uma temperatura de saturação para a referida pressão, gerando o vapor superaquecido. No programa, a temperatura de saturação foi multiplicada por 1,1, 1,2, 1,4 e 1,8, ou seja,

- $T_{a'} := 1,1 T_{a'}$
- $T_{a'} := 1,2 T_{a'}$
- $T_{a'} := 1,4 T_{a'}$
- $T_{a'} := 1,8 T_{a'}$

Além disso, no programa, modificou-se a função de consulta das tabelas termodinâmicas de vapor saturado para vapor superaquecido, nos reagentes da equação química. Para isso utilizou-se os dados das tabelas de NISTIR 5078 [8], cujos valores foram convertidos pelos valores de referência de Bathie [3] utilizando as entalpia e entropia de formação citadas anteriormente.

Deve-se notar que quanto maior a temperatura $T_{a'}$ do vapor superaquecido na saída do Regenerador, menor a temperatura de exaustão T_6 , devido à uma maior transferência de calor dos gases de exaustão para a água que sai da Bomba.

Então, foram criados mais quatro gráficos através dos dados fornecidos pelo programa. Adicionalmente plotou-se uma curva para o vapor saturado ($T_{a'} := 1,0 T_{a'}$) nestes gráficos, para uma comparação entre os estados de vapor.

O gráfico da Figura 5.45 nos mostra que o programa otimiza a função objetivo (potência específica) com sucesso, havendo aumento da mesma ao decorrer das iterações. Já para o caso da Figura 5.46, assim como todos os casos de otimização de rendimento térmico por razão de compressão feitos até o momento para $T_3 = 1800\text{K}$, mostrou-se que a otimização não atingiu os seus valores ótimos devido a restrição que foi imposta na linguagem do programa para que o loop de otimização finalizasse quando o mesmo alcançasse rc maior ou igual a 50.

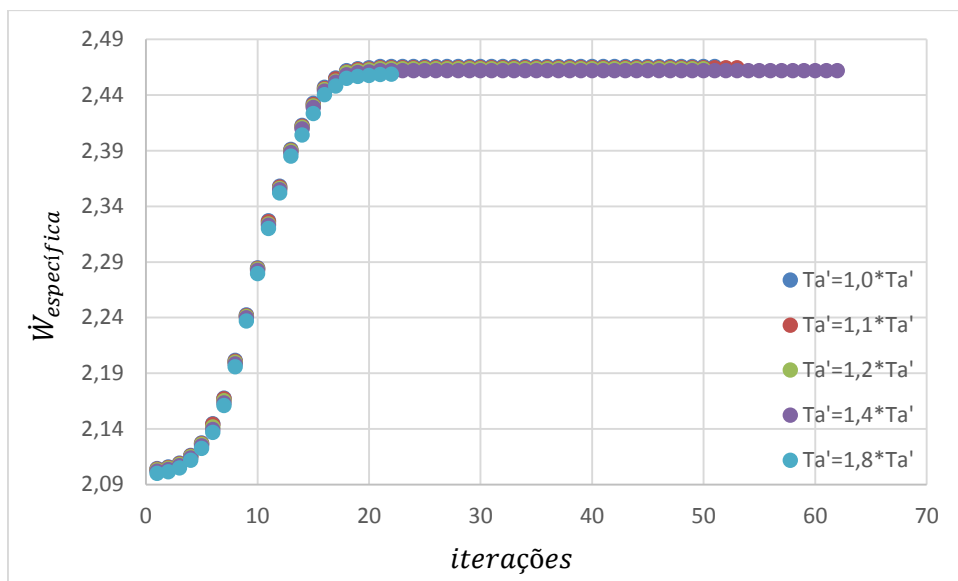


Figura 5.45 – $\dot{W}_{especifica}$ por *iterações* para os casos das cinco temperaturas abordadas para o vapor.

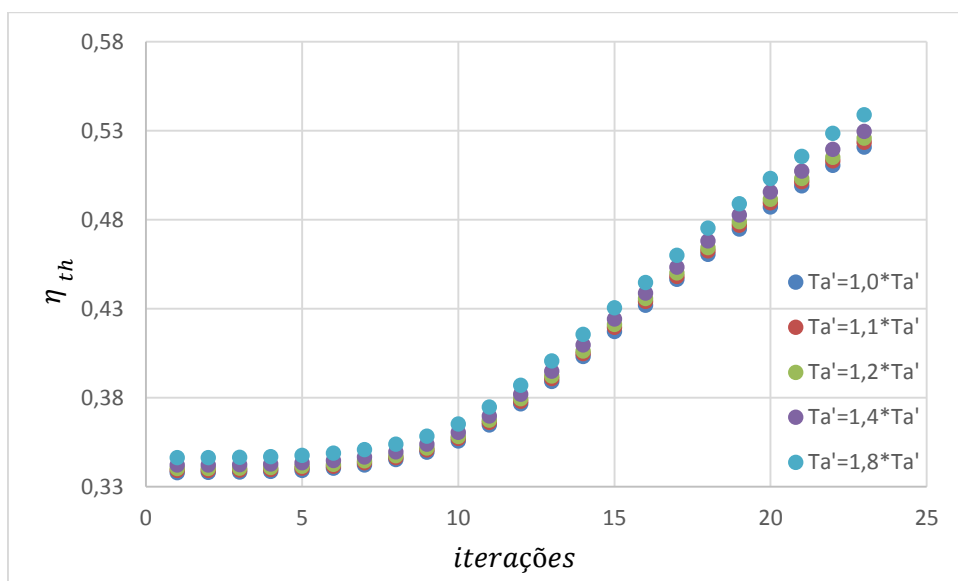


Figura 5.46 – η_{th} por *iterações* para os casos das cinco temperaturas abordadas para o vapor.

As Figuras 5.47 e 5.48 nos revelam o comportamento do vapor superaquecido.

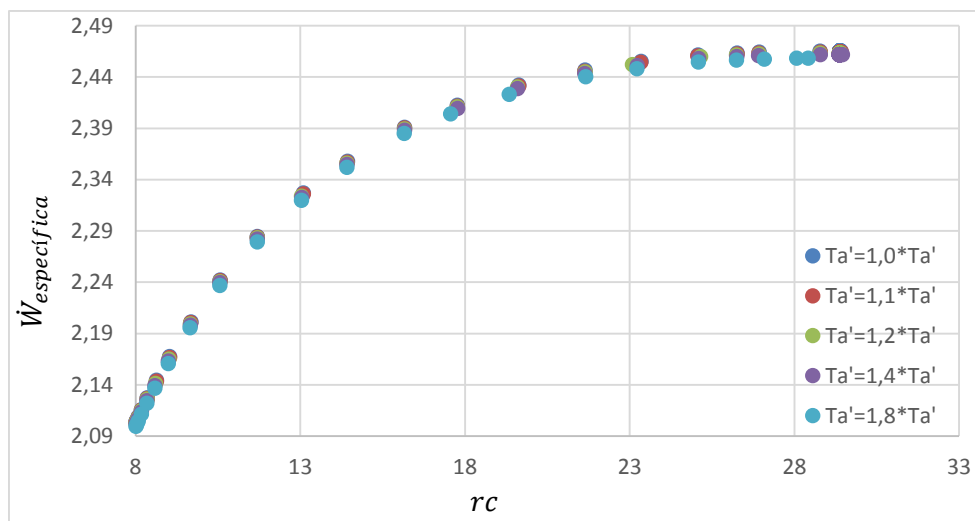


Figura 5.47 – Otimização da $\dot{W}_{especifica}$ para os casos das cinco temperaturas abordadas para o vapor.

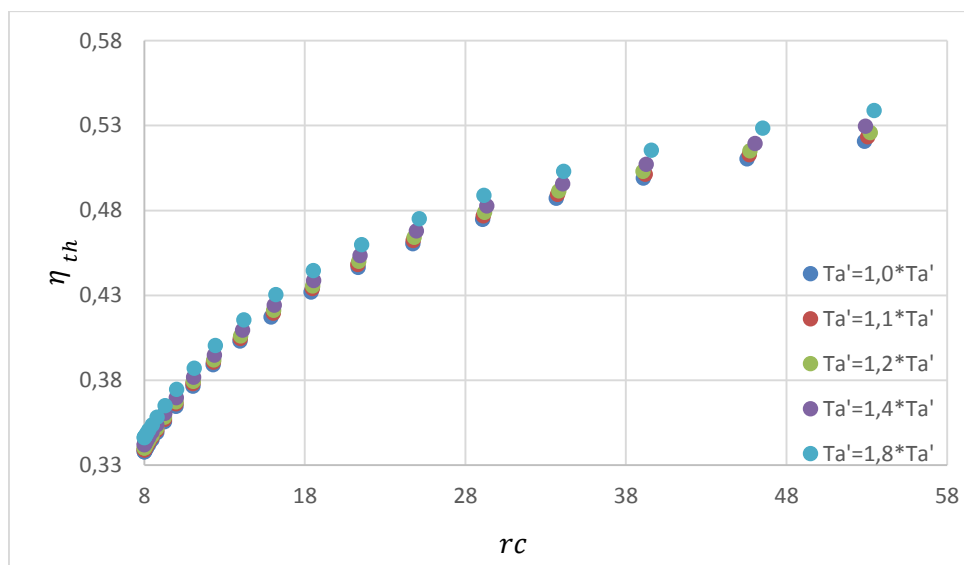


Figura 5.48– Otimização da η_{th} para os casos das cinco temperaturas abordadas para o vapor.

Podemos verificar na Figura 5.47 que entre o vapor saturado e o vapor superaquecido de maior temperatura houve uma perda de aproximadamente 0,28% em termos de potência específica. Isto ocorre pois, como há diminuição da massa de

combustível que entra na Câmara de Combustão, existe um decréscimo na potência, pois ela é função da razão Combustível/Ar:

$$\dot{W}_{tp} = t x m \frac{\bar{w}_{tpi} F/A}{M_{combustível}} \eta_{th} \quad (5.1)$$

Logo, com uma diminuição da potência, há um decréscimo da potência específica.

Com a Figura 5.48 podemos concluir que quanto maior a temperatura de injeção do vapor na Câmara de combustão, menor a massa de combustível necessária para elevar a temperatura até a temperatura de saída, T_3 . Com isso, \dot{Q}_h diminui e o rendimento térmico do ciclo, η_{th} , aumenta. Logo, temos um maior rendimento para o vapor superaquecido do que para o vapor saturado e, quanto maior a temperatura do vapor superaquecido, maior o rendimento. Nesta figura presenciamos um ganho de aproximadamente 3,6% entre o vapor saturado e o vapor superaquecido de maior temperatura.

5.7. TEMPERATURA DE EXAUSTÃO, T_6

A seguir, faremos uma breve análise da temperatura de exaustão da Turbina, T_6 .

Inicialmente temperatura T_6 foi analisada para o combustível C_8H_{18} e, no ponto de rendimento térmico ótimo, considerando $T_3 = 1200K$ (por ser a menor temperatura estudada dentre as quatro) e, para cada porcentagem de vapor saturado injetado, obteve-se T_6 de 580,31, 578,29, 572,82, 566,00 e 555,56K para 1, 2, 3, 4 e 5%, respectivamente. Com isso, pode-se observar que existe uma relação de influência da porcentagem do vapor injetado que, ao aumentar, provoca diminuição da temperatura T_6 .

Adicionalmente, a Figura 5.49, para C_8H_{18} , no ponto de otimização, demonstra que quanto maior a porcentagem de vapor injetado, menor a temperatura T_5 e, conseqüentemente, menor T_6 . E com a Figura 5.50, podemos concluir que o aumento da porcentagem de vapor, retorna uma pequena diferença entre as temperaturas T_5 e

T_6 , ligeira troca térmica entre os gases de exaustão e a água no Regenerador e uma leve diminuição da temperatura T_6 .

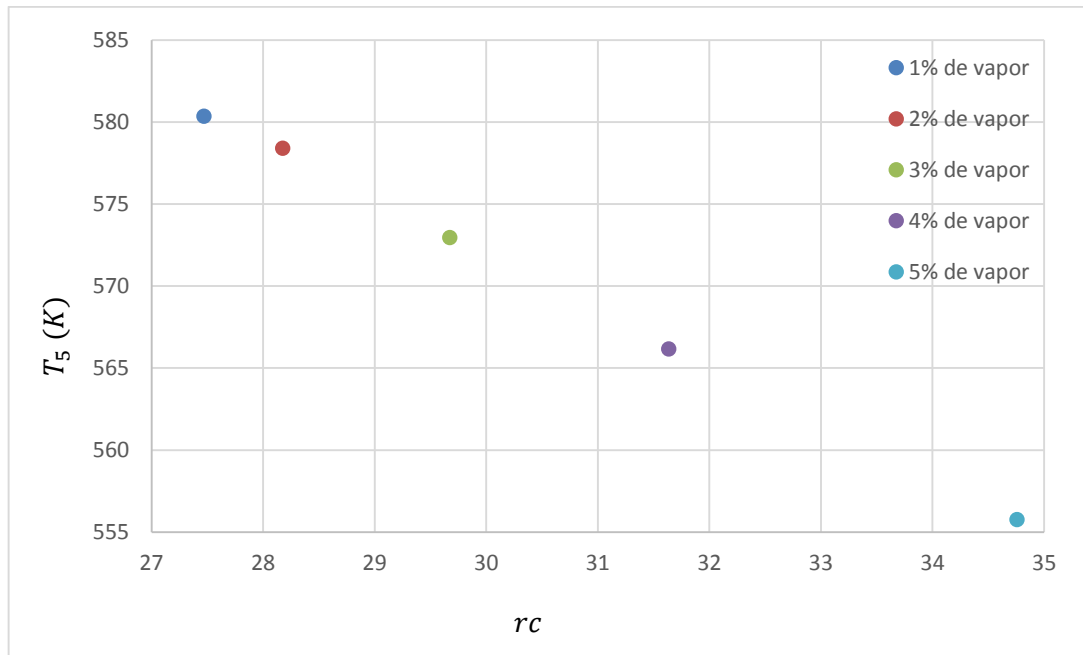


Figura 5.49 - T_5 por rc para diferentes porcentagens de vapor saturado, considerando o combustível C_8H_{18} , no ponto de otimização.

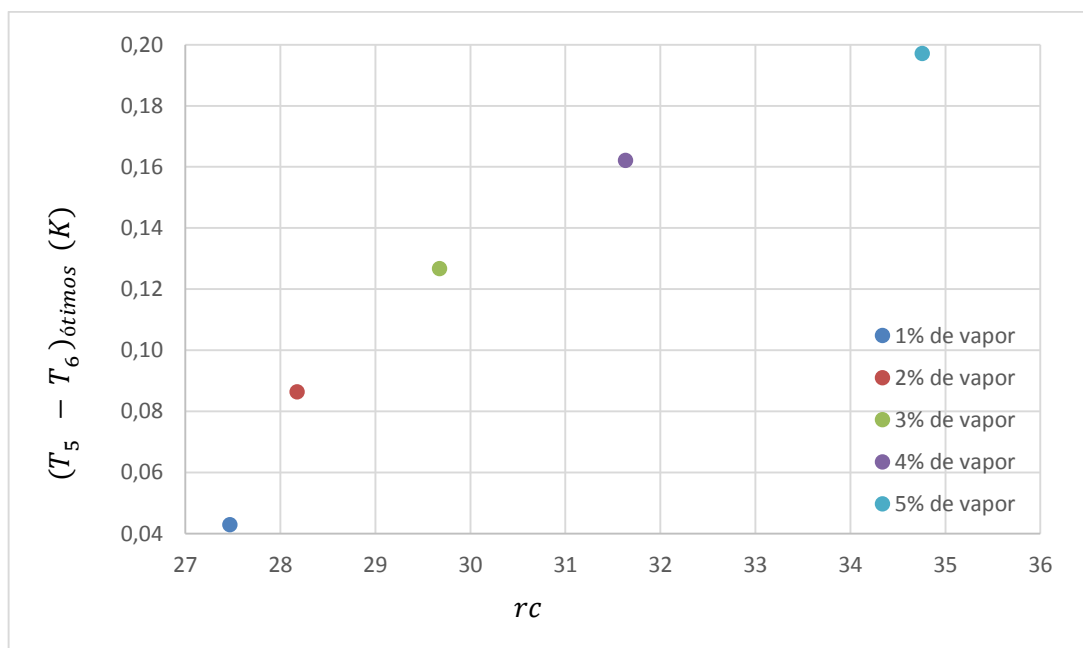


Figura 5. 50 – $(T_5 - T_6)_{otimos}$ por rc para diferentes porcentagens de vapor saturado, considerando o combustível C_8H_{18} , no ponto de otimização.

Considerando-se 5% de vapor saturado (devido a observação de que quanto maior a quantidade de vapor injetado, menor T_6 , para o caso de rendimento térmico ótimo), encontraram-se as seguintes temperaturas T_6 : 555,56K, 553,65K e 555,64K para C_8H_{18} , CH_4 e $C_{14}H_{30}$, respectivamente. Logo, podemos concluir que a diferença de temperatura de exaustão entre cada combustível é de pouca relevância.

Então, em a uma análise levando em consideração, para condição de rendimento térmico ótimo, uma injeção de 5% de vapor superaquecido de maior temperatura ($1,8 * T_{av}$), que implica em uma maior troca térmica no Regenerador e um maior decréscimo da temperatura dos gases de exaustão, obtivemos uma temperatura mínima da exaustão da ordem de 535K para os três combustíveis.

Com isso, podemos concluir que, com uma temperatura mínima da ordem de 535K, afasta-se a possibilidade de presença de condensados na chaminé e sua eventual corrosão.

5.8. MISFIRE

Uma última análise deve ser feita, considerando a possibilidade de ocorrência de Misfire.

Inicialmente, considerando o caso de otimização da potência específica, foram encontrados, como casos mais críticos, Excessos de Ar em torno de 300% para os seguintes casos:

- C_8H_{18} ; 1% de vapor injetado; $T_3=1200K$; vapor saturado (excesso de ar de 300,639%);
- $C_{14}H_{30}$; 1% de vapor injetado; $T_3=1200K$; vapor saturado (excesso de ar de 301,169%);

- C_8H_{18} ; 1% de vapor injetado; $T_3=1200K$; vapor superaquecido para todas as temperaturas abordadas (de 301,314% para 1,1 T_{ar} , até 305,045% para 1,8 T_{ar});
- $C_{14}H_{30}$; 1% de vapor injetado; $T_3=1200K$; vapor superaquecido para todas as temperaturas abordadas (de 301,846% para 1,1 T_{ar} , até 305,992% para 1,8 T_{ar}).

Pode-se notar que quanto menor T_3 , menor a quantidade de combustível a ser adicionada para que T_3 seja alcançado na saída da Câmara de Combustão, aumentando o excesso de ar. Esta observação também é válida para os casos do uso menor porcentagem de injeção de vapor e do uso de vapor superaquecido (notando que, conseqüentemente, quanto maior a temperatura do vapor superaquecido, maior o Excesso de Ar).

Considerando o caso da otimização do rendimento térmico do ciclo, obteve-se Excesso de Ar elevado para todos os casos abordados, entre 468 e 480%.

Para valores muito altos de Excesso de Ar, provavelmente pode ocorrer Misfire e, neste caso, uma investigação mais profunda se torna necessária em trabalhos futuros.

6. CONCLUSÕES

A partir de uma série de gráficos elaborados através dos resultados fornecidos pelo programa, para combustão completa, e suas posteriores interpretações, concluiu-se que a injeção de vapor na Câmara de Combustão aumenta, de fato, a potência específica e o rendimento da Turbina a Gás. Quanto maior a injeção de vapor, maiores são os efeitos.

Pôde-se analisar que quanto maior a temperatura de saída da Câmara de combustão, maior a potência específica e maior a razão de compressão para uma potência ótima, confirmando o que encontra-se na literatura.

Observou-se que houve uma pequena perda na potência, para quanto mais superaquecido foi o vapor, mas também houve um o ganho considerável em termos de eficiência, comparando com um ciclo com injeção de vapor saturado.

Adicionalmente notou-se que, para os três combustíveis testados pelo programa, os efeitos provocados pela injeção de vapor tiveram a mesma tendência com relação ao aumento de potência específica e de rendimento térmico do ciclo.

Observou-se também que quanto maior a porcentagem e temperatura de vapor injetado, menor a temperatura de exaustão. Porém tal fato não implicaria em uma possível ocorrência de condensados.

Para trabalhos futuros, sugere-se uma análise utilizando:

- combustíveis oxigenados;
- investigações de Misfire para Excessos de Ar elevados;
- incrementação do ciclo termodinâmico com novos componentes, como por exemplo, um Regenerador antes da Câmara de Combustão;
- otimização Multi-Objetivo;
- minimização de T_3 e maximização de $\dot{W}_{específica}$, para excesso de ar fixo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] De Paepe, M., Dick, E., “Technological and economical analysis of water recovery insteam injected gas turbines”, *Applied Thermal Engineering*, v. 21, n. 2, pp.135-156 , 2001.
- [2] Borat, O., “Eficiency improvement and superiority of steam injection in gas turbines”, *Energy Conversion and Management*, v. 22, n. 1, pp.13-18, 1982.
- [3] Bathie, W., 1996, *Fundamentals of Gas Turbines*, 2ª ed., United States, John Wiley & Sons.
- [4] Colaço, M., *Turbinas*, 15 de outubro de 2012, 16 de janeiro de 2013, Notas d Aula
- [5] Cârdú, M., Baica, M., “Gas turbine installation with total water injection in the combustion chamber”, *Energy Conversion and Management*, v. 43, n. 17, pp.2395-2404, 2002.
- [6] Iman Janghorban Esfahani, C., “Feasibility study and performance assessment for the integration of a steam-injected gas turbine and thermal desalination system”, *Desalination*, v. 332, n. 1, pp. 18-32, 2013.
- [7] Livshits, M., Kribus, A., “Solar hybrid steam injection gas turbine (STIG) cycle”, *Solar Energy*, v. 86, n. 1, pp.190-200, 2012.
- [8] “*NISTIR 5078*, Tabulation from the IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use”,

<http://www.nist.gov/srd/upload/NISTIR5078.htm>, acessado em 03/12/2013 às 21:23 horas.

[9] Ghosh, A., Chakraborti, P., Pal, S., "Impact of diesel oil effluent in the mucosal surface of the alimentary canal of *Oreochromis nilotica* (Linnaeus): A scanning electron microscopic study", *Journal of environmental biology / Academy of Environmental Biology*, v. 27, n. 1, pp.129-34

[10]http://cta.ornl.gov/bedb/appendix_a/Lower_and_Higher_Heating_Values_of_Gas_Liquid_and_Solid_Fuels.pdf, acessado em 03/12/2013 às 21:23 horas.

[11]<http://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7732185&Units=SI&Mask=2#Thermo-Condensed>, acessado em 04/12/2013 às 14:58 horas.

[12] Colaço, M., Orlande, H., Dulikravich, G., Inverse and Optimization Problems in Heat Transfer, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 28, n. 1, pp. 1-24, 2006.

APÊNDICE
PROGRAMAS EM FORTRAN

- 1) Programação em Fortran para otimização da potência específica com injeção de vapor saturado seco na câmara de combustão:

```
program otimizacao
implicit none
real(8) x(2),g(2),gold(2),d(2),dold(2),nth, nthold, xtmp2(2), alfa, eps, epsmin, epsold,
Tcombustivel,T1,P1,P2,T3,P3,P5,Tw,Pw,txMw,txm,i,P_EntradaNaBomba,nb,nc,nt,ntp,POT_TP
eal,fobj,fobjold,A_Freal,excesso_de_ar,alfa0
integer C, H, n, k, kmax,COMBUSTIVEL,fil,fil1
```

```
n=2
```

```
alfa=0.1d0
alfa0=alfa
epsmin=epsilon(0.d0)
eps=1.d0
epsold = 1.d50
fobjold=1.d200
fobj=1.d100
```

```
k=0
nthold=1.d50
```

```
open(unit=25,file="output2.dat",status="unknown") !define o arquivo de saida
```

```
write(*,*)"entre com T3"
read(*,*)T3
```

```
txm = 0.45d0; Tcombustivel=298.d0;T1=288.d0;P1=101.3d0;P3=811.d0;P5=101.3d0;
```

```
P2=P3
x(1)=P2/P1
```

```
write(*,*)"entre com a % de agua"
read(*,*)i
Tw=653.d0;Pw=1378.2d0;P_EntradaNaBomba=100.d0;nb=0.87d0;
```

```
txm=0.45d0
```

```
txMw = (i/100)*txm
```

```
x(2) = txMw
```

```
nc=0.87d0;nt=0.89d0;ntp=0.89d0;
```

```
write(*,*)"entre com as quantidades de atomos de C e H que seu combustivel tem"
read(*,*)C,H
```

```
COMBUSTIVEL=C+H
```

```

do while((k.lt.1000.d0).and.(x(1).gt.8.d0).and.(x(1).lt.50.d0))

    k=k+1

    call gradiente_dif_fin(T1, P1, T3, P3, P5, C, &
                          H,Tcombustivel,COMBUSTIVEL,txm,txMw,Tw,Pw,P_EntradaNaBomb
                          a,nb,k,n,x,nc,nt,ntp, g,gold,d,dold,fobj,fobjold,A_Freal,excesso_de_ar)
    xtmp2=x
5      x=x+alfa*d

    if(x(2).gt.(0.05d0*txm))then
        x(2)=0.05d0*txm
    end if
    if(x(2).le.(0.d0))then
        x(2)=epsilon(0.d0)
    end if

    if(nc.gt.1.d0)then
        nc=1.d0 !restricao fisica (rendimento nao pode ser maior que 100%)
    end if
    if(nt.gt.1.d0)then
        nt=1.d0 !restricao fisica (rendimento nao pode ser maior que 100%)
    end if
    if(ntp.gt.1.d0)then
        ntp=1.d0 !restricao fisica (rendimento nao pode ser maior que 100%)
    end if

    call rendimento(T1, P1, T3, P3, P5, C, H, &
                    Tcombustivel,COMBUSTIVEL,txm,txMw,Tw,Pw,P_EntradaNaBomba,nb,k,n,x,nc,nt,ntp,PO
                    T_TPreal,nth,fobj,fobjold,A_Freal,excesso_de_ar)

    if(fobj.lt.fobjold)then

        alfa=alfa*1.5d0
        fobjold = fobj
    else
        call erro(n,g,eps,epsold)
        if((eps.le.epsmin).or.(dabs(fobj-fobjold).le.epsmin)) then
            write(*,*) "Programa convergiu"
            read(*,*)
            stop
        end if

        alfa=alfa/1.5d0
        x=xtmp2
        goto 5
    end if

    write(25,19)k,x(1),x(2),POT_TPreal,A_Freal,excesso_de_ar,-nth, -fobj
    write(*,19)k,x(1),x(2),POT_TPreal,A_Freal,excesso_de_ar,-nth, -fobj
19  format(i4,1x,7(f19.12,1x))

end do

```



```

close(25)
end program otimizacao

```

```

!*****
!*****

```

```

subroutine erro(n,g,eps,epsold)
implicit none
integer n
real(8) eps,epsold,g(2)
epsold=eps
eps=dsqrt(g(1)*g(1)+g(2)*g(2))
!write(*,*)eps
end subroutine erro

```

```

!*****
!*****

```

```

subroutine gradiente_dif_fin(T1, P1, T3, P3, P5, C,
H,Tcombustivel,COMBUSTIVEL,txm,txMw,Tw,Pw,P_EntradaNaBomba,nb,k,n,x,nc,nt,ntp,g,gold
,,&d,dold,fobj,fobjold,A_Freal,excesso_de_ar)
implicit none
integer n,k,C, H,COMBUSTIVEL
real(8)x(n),g(2),gold(2),d(2),dold(2),xtemp(n),nthtemp1,nthtemp2,nthtemp3,nthtemp4,deltax,delt
ay,deltaz,deltaw,xtemp_antes(4),gamak,nth,T1,P1,T3,P3,P5,Tcombustivel,txm,txMw,Tw,Pw,P_
EntradaNaBomba,nb,nc,nt,ntp,POT_TPreal,fobj, fobjtemp1,
fobjtemp2,fobjold,A_Freal,excesso_de_ar

```

```

deltax=1.d-5
deltay=1.d-5

```

```

call rendimento(T1, P1, T3, P3, P5, C, H, &
Tcombustivel,COMBUSTIVEL,txm,txMw,Tw,Pw,P_EntradaNaBomba,nb,k,n,x,
nc,nt,ntp,POT_TPreal,nth,fobj,fobjold,A_Freal,excesso_de_ar)

```

```

xtemp(1)=x(1)+deltax
xtemp(2)=x(2)
call rendimento(T1, P1, T3, P3, P5, C, H,
&Tcombustivel,COMBUSTIVEL,txm,txMw,Tw,Pw,P_EntradaNaBomba,nb,k,n,
xtemp,nc,nt,ntp,POT_TPreal,nth, fobjtemp1,fobjold,A_Freal,excesso_de_ar)

```

```

gold(1)=g(1)
g(1)=(fobjtemp1-fobj)/(deltax)

```

```

xtemp(2)=x(2)+deltay
xtemp(1)=x(1)
call rendimento(T1, P1, T3, P3, P5, C, H, &
Tcombustivel,COMBUSTIVEL,txm,txMw,Tw,Pw,P_EntradaNaBomba,nb,k,n,xte
mp,nc,nt,ntp,POT_TPreal,nth, fobjtemp2,fobjold,A_Freal,excesso_de_ar)

```

```

gold(2)=g(2)
g(2)=0.d0

```

```

if (k==1) then
gamak = 0.d0
d(1)= -g(1)
d(2)= -g(2)
else
dold(1:2)=d(1:2)
gamak = ( ( g(1)*g(1)) + (g(2)*g(2)) ) / ( ( gold(1)*gold(1)) + (gold(2)*gold(2)) ) )

```

```

        d(1)= -g(1) + (gamak*dold(1))
        d(2)= -g(2) + (gamak*dold(2))
    continue
end if

```

```

end subroutine gradiente_dif_fin

```

```

!*****
!*****

```

```

subroutine rendimento(T1, P1, T3, P3, P5, C, H,&
Tcombustivel,COMBUSTIVEL,txm,txMw,Tw,Pw,P_EntradaNaBomba,nb,k,n,x,nc,nt,ntp,POT_T
Preal,nth,fobj,fobjold,A_Freal,excesso_de_ar)
use ThermCoeffProp
use Thermo_Prop_Calc
implicit none
integer n,k, C, H, Col1, Col2_1,Col2_2, Col3, COMBUSTIVEL
real(8) x(n), nth, QH, h1, h2, h2i, h3,h4, h4i,h5i,Pr1,Pr2, Pr3, Pr4, Pr4i, Pr5i,T1, P1,T2,T2i, T3,
T4, T4i, P3, P4, P5,T5i,Tcombustivel,WCideal,WTideal, WCreai,WTreal,WTreal_molar,
WTPideal_molar, WTPideal, WTPreal,Wliq, hARreagentes,h_O2reagentes,&
hN2reagentes,h_CO2,hH2Oreagentes,hH2Oprodutos,
hARprodutos,hN2produtos,M_combustivel, M_H2O,M_CO2, M_O2, M_N2, M_C, M_H,
Air(5,489),IGH2OProp(6,46), CO2Prop(6,46),O2Prop(6,46),
N2Prop(6,46),comb(3,6),coefCO2,coefO2,coefN2,txm,txMw, Tw , Pw,
coefH2Oprodutos,coefH2Oreagentes,coefAR, A_Fest, A_Freal, F_Areal, excesso_de_ar,
PClcombustivel, hcombustivel,SFC,HR,POT,den,num,y_ar,y_H2O,y_CO2,
y_N2,chuteT4,h4_chute,chuteT4i,h4i_chute,s3_molar,s4i_molar, &
s4_molar,s5i_molar,s5i_chute,chuteT5i,POT_TPideal,POT_TPreal,QH_ponto,coefcombustivel,
POTbomba_ideal,POTbomba_real,nb,densidadeH2O,WTreal_combustivel
,WTreal_combustivel_molar,WTideal_combustivel,WTideal_combustivel_molar,P_EntradaNaBo
mba,h6_chute, n_total, n_CO2, n_H2O, n_ar, n_N2,h2oCLSH(4,105),H2OSatTE(12,375),
H2OSatPE(12,272), Pb,
b,hb,sb,Pa,ha,chuteT6,chuteh6,T6,h6,h5_antes,rendimento_regenerador,
rendimento_regeneradorDepois, Ta_sat, ha_VapSat, ha_linha, WTPreal_molar, nc, nt, ntp,
m_mistura,m_total, Ta_linha, T5,chuteT5,h5_chute,h5,fobj,fobjold,AUX

```

```

M_H2O=18.d0
M_O2=32.d0
M_N2=28.d0
M_H=1.d0
M_C=12.d0
M_CO2=M_C + M_O2
M_combustivel=(C*M_C)+(H*M_H)

```

```

!BOMBA:*****
! T=30C, P=101,3KPa => Líquido Comprimido

```

```

Pb=101.3d0

```

```

call Sat_H2O_TE_Prop(H2OSatTE)
call Sat_H2O_PE_Prop(H2OSatPE)
call h2oCLSH_prop(Pb,h2oCLSH)

```

```

Tb= 30.d0 + 273.15d0

```

```

hb=( hH2OCL(Tb,h2oCLSH) * M_H2O) - 285830.d0 !KJ/Kmmol (nist -> bathie)
sb= sH2OCL(Tb,h2oCLSH) !KJ/KgK

```

```

Pa=Pw !Pw=1378.2d0

call h2oCLSH_prop(Pa,h2oCLSH)

ha= ( hsH2OCL(sb,h2oCLSH)* M_H2O ) - 285830.d0 !KJ/Kmol (nist -> bathie)

sb= (sH2OCL(Tb,h2oCLSH) * M_H2O )+ (69.95d0) !KJ/KmolK (nist -> bathie)

POTbomba_real= x(2)*(ha-hb) /18.d0

!REGENERADOR ( 1a parte )*****

Ta_linha=TH2OSat(Pa,H2OSatPE) !k

ha_linha=( hgH2OSat(Ta_linha,H2OSatTE) * M_H2O ) - 285830.d0 !KJ/Kmol (nist -> bathie)


!COMPRESSOR*****
call Air_Prop(Air)

Col1=1
h1=hAir(T1,Air,Col1)
Pr1=PrAir(T1,Air,Col1)

Pr2=Pr1*x(1)
Col2_1=5
T2i= TAir(Pr2,Air,Col2_1)
h2i=hAir(Pr2,Air,Col2_1)!2i ideal

WCideal= h2i-h1
WCreal=WCideal/nc

h2= WCreal + h1 !2 real
col2_2=3
T2=TAir(h2,Air,Col2_2)

if (T2.gt.T3) then
write(*,*)"T2 nao pode ser maior que T3"
read(*,*)
stop
end if

!CÂMARA DE COMBUSTÃO *****
call N2_Prop(N2Prop)
call CO2_Prop(CO2Prop)
call O2_prop(O2Prop)
call IdealH2O_Prop(IGH2OProp)


!COMBUSTIVEL = tipo formula entalpia de formacao PCI
!
!          5 (CH4)   -74.809d0    50012.d0
!          8 (C2H6)  -84.685d0    44521.d0
!          11 (C3H8) -103.849d0   46351.d0
!          14 (C4H10) -147.655d0  45342.d0
!          19 (C7H12) -224.392d0  44555.d0
!          26 (C8H18) -249.957d0  44422.d0
!
!
if (COMBUSTIVEL == 5) then
hcombustivel = -74.809d0

```

```

        PClcombustivel= 50012.d0
    else if (COMBUSTIVEL == 8) then
hcombustivel = -84.685d0
        PClcombustivel = 44521.d0
    else if (COMBUSTIVEL == 11) then
hcombustivel = -103.849d0
        PClcombustivel = 46351.d0
    else if (COMBUSTIVEL == 14) then
hcombustivel = -147.655d0
        PClcombustivel = 45342.d0
    else if (COMBUSTIVEL == 19) then
hcombustivel = -224.392d0
        PClcombustivel= 44555.d0
    else if (COMBUSTIVEL == 26) then
hcombustivel = -249.957d0
        PClcombustivel = 44422.d0
    else if (COMBUSTIVEL == 44) then
hcombustivel = -403.d0
        PClcombustivel = 42791.d0
end if

```

```

!entalpia molar dos reagentes:
hcombustivel = hcombustivel * 1000.d0
hARreagentes= hAir(T2,Air,Col1)
h_O2reagentes= hO2(T2, O2Prop)
hN2reagentes= hN2(T2, N2Prop)
hH2Oreagentes = ha_linha

```

```

!entalpia molar dos produtos:
h_CO2= hCO2(T3, CO2Prop)
hH2Oprodutos= hH2O(T3, IGH2OProp)
hARprodutos= hAir(T3,Air,Col1)
hN2produtos= hN2(T3, N2Prop)

```

```

coefcombustivel=1.d0
coefCO2=C
coefO2=((2.d0*C) + (H/2.d0))/2.d0
coefN2=3.72d0*coefO2

```

```

!*****

```

```

!Hr=Hp:

```

```

AUX =( -( (M_O2 + (3.72d0*M_N2))*coefO2*(txMw/txm) ) - ((M_H2O/2.d0)*H) )/(txMw/txm)

```

```

den= (coefCO2*h_CO2)+(AUX*(hARprodutos-hARreagentes))+(coefN2*hN2produtos)-(
(coefcombustivel*hcombustivel)+(coefO2*h_O2reagentes)+(coefN2*hN2reagentes)-
((H/2.d0)*hH2Oreagentes) )

```

```

num=( ( (M_H2O/(txMw/txm))*(hARreagentes-hARprodutos) ) + (hH2Oreagentes-
hH2Oprodutos) )

```

```

coefH2Oprodutos=den/num

```

```

!*****

```

```

coefH2Oreagentes= coefH2Oprodutos -(H/2.d0)

```

```

coefAR=( AUX + (M_H2O*coefH2Oprodutos/(txMw/txm)) )/28.965d0

```

```

A_Fest= ((coefO2*M_O2)+(coefN2*M_N2))/((C*M_C)+(H*M_H))

A_Freal= ((coefO2*M_O2)+(coefN2*M_N2)+( coefAR*28.965d0))/((C*M_C)+(H*M_H))

excesso_de_ar= ( ((A_Freal - A_Fest)/ A_Fest) * 100.d0 ) !%

F_Areal= 1.d0/(A_Freal)

PClcombustivel= PClcombustivel

!TURBINA*****

h3 =( (coefCO2*h_CO2) + (coefH2Oprodutos*hH2Oprodutos) +
(coefAR*28.965d0*hARprodutos) + (coefN2*hN2produtos) )

WTreal = WCreai
WTreal_combustivel = WTreal*A_Freal ! KJ/Kg de combustivel
WTreal_combustivel_molar = WTreal_combustivel*M_combustivel !KJ/Kmol de combustivel

h4 = h3 - WTreal_combustivel_molar

Col3=1
chuteT4=T3

h4_chute=0.d0

do while (dabs(h4_chute-h4)/dabs(h4).gt.1d-1)
  chuteT4= chuteT4 - 1.d-1
  h4_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4, N2Prop))
end do
chuteT4= chuteT4 + 1.d-1

do while (dabs(h4_chute-h4)/dabs(h4).gt.1d-2)
  chuteT4= chuteT4 - 1.d-2
  h4_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4, N2Prop))
end do
chuteT4= chuteT4 + 1.d-2

do while (dabs(h4_chute-h4)/dabs(h4).gt.1d-3)
  chuteT4= chuteT4 - 1.d-3
  h4_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4, N2Prop))
end do
chuteT4= chuteT4 + 1.d-3

do while (dabs(h4_chute-h4)/dabs(h4).gt.1d-4)
  chuteT4= chuteT4 - 1.d-4
  h4_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4, N2Prop))
end do
chuteT4= chuteT4 + 1.d-4

do while (dabs(h4_chute-h4)/dabs(h4).gt.1d-5)
  chuteT4= chuteT4 - 1.d-5
  h4_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4,

```

```

IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4, N2Prop))
end do
chuteT4= chuteT4 + 1.d-5

do while (dabs(h4_chute-h4)/dabs(h4).gt.1d-6)
  chuteT4= chuteT4 - 1.d-6
  h4_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4, N2Prop))
end do
chuteT4= chuteT4 + 1.d-6

do while (dabs(h4_chute-h4)/dabs(h4).gt.1d-7)
  chuteT4= chuteT4 - 1.d-7
  h4_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4, N2Prop))
end do
chuteT4= chuteT4 + 1.d-7

do while (dabs(h4_chute-h4)/dabs(h4).gt.1d-8)
  chuteT4= chuteT4 - 1.d-8
  h4_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4, N2Prop))
end do
chuteT4= chuteT4 + 1.d-8

do while (dabs(h4_chute-h4)/dabs(h4).gt.1d-9)
  chuteT4= chuteT4 - 1.d-9
  h4_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4, N2Prop))
end do
chuteT4= chuteT4 + 1.d-9

do while (dabs(h4_chute-h4)/dabs(h4).gt.1d-10)
  chuteT4= chuteT4 - 1.d-10
  h4_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4, N2Prop))
end do
chuteT4= chuteT4 + 1.d-10

do while (dabs(h4_chute-h4)/dabs(h4).gt.1d-11)
  chuteT4= chuteT4 - 1.d-11
  h4_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4, N2Prop))
end do
chuteT4= chuteT4 + 1.d-11

do while (dabs(h4_chute-h4)/dabs(h4).gt.1d-12)
  chuteT4= chuteT4 - 1.d-12
  h4_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4, N2Prop))
end do

T4= chuteT4

WTideal= WTreal/nt
WTideal_combustivel = WTideal*A_Freal ! KJ/Kg de combustivel
WTideal_combustivel_molar = WTideal_combustivel*M_combustivel !KJ/Kmol de combustivel

```

```

h4i = h3 - WTideal_combustivel_molar

chuteT4i=T3
h4i_chute=0.d0

do while (dabs(h4i_chute-h4i)/dabs(h4i).gt.1d-1)
  chuteT4i= chuteT4i - 1.d-1
  h4i_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4i, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4i,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4i,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4i, N2Prop))
end do
  chuteT4i= chuteT4i + 1.d-1

do while (dabs(h4i_chute-h4i)/dabs(h4i).gt.1d-2)
  chuteT4i= chuteT4i - 1.d-2
  h4i_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4i, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4i,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4i,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4i, N2Prop))
end do
  chuteT4i= chuteT4i + 1.d-2

do while (dabs(h4i_chute-h4i)/dabs(h4i).gt.1d-3)
  chuteT4i= chuteT4i - 1.d-3
  h4i_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4i, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4i,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4i,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4i, N2Prop))
end do
  chuteT4i= chuteT4i + 1.d-3

do while (dabs(h4i_chute-h4i)/dabs(h4i).gt.1d-4)
  chuteT4i= chuteT4i - 1.d-4
  h4i_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4i, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4i,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4i,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4i, N2Prop))
end do
  chuteT4i= chuteT4i + 1.d-4

do while (dabs(h4i_chute-h4i)/dabs(h4i).gt.1d-5)
  chuteT4i= chuteT4i - 1.d-5
  h4i_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4i, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4i,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4i,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4i, N2Prop))
end do
  chuteT4i= chuteT4i + 1.d-5

do while (dabs(h4i_chute-h4i)/dabs(h4i).gt.1d-6)
  chuteT4i= chuteT4i - 1.d-6
  h4i_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4i, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4i,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4i,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4i, N2Prop))
end do
  chuteT4i= chuteT4i + 1.d-6

do while (dabs(h4i_chute-h4i)/dabs(h4i).gt.1d-7)
  chuteT4i= chuteT4i - 1.d-7
  h4i_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4i, CO2Prop)) +
(coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4i, IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4i,Air,Col3))
+ (coefN2*hN2(chuteT4i, N2Prop))
end do
  chuteT4i= chuteT4i + 1.d-7

do while (dabs(h4i_chute-h4i)/dabs(h4i).gt.1d-8)
  chuteT4i= chuteT4i - 1.d-8
  h4i_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4i, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4i,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4i,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4i, N2Prop))

```

```

end do
    chuteT4i= chuteT4i + 1.d-8

do while (dabs(h4i_chute-h4i)/dabs(h4i).gt.1d-9)
    chuteT4i= chuteT4i - 1.d-9
    h4i_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4i, CO2Prop)) +
(coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4i, IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4i,Air,Col3))
+ (coefN2*hN2(chuteT4i, N2Prop))
end do
    chuteT4i= chuteT4i + 1.d-9

do while (dabs(h4i_chute-h4i)/dabs(h4i).gt.1d-10)
    chuteT4i= chuteT4i - 1.d-10
    h4i_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4i, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4i,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4i,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4i, N2Prop))
end do
    chuteT4i= chuteT4i + 1.d-10

do while (dabs(h4i_chute-h4i)/dabs(h4i).gt.1d-11)
    chuteT4i= chuteT4i - 1.d-11
    h4i_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4i, CO2Prop)) +
(coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4i, IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4i,Air,Col3))
+ (coefN2*hN2(chuteT4i, N2Prop))
end do
    chuteT4i= chuteT4i + 1.d-11

do while (dabs(h4i_chute-h4i)/dabs(h4i).gt.1d-12)
    chuteT4i= chuteT4i - 1.d-12
    h4i_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4i, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4i,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4i,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4i, N2Prop))
end do

T4i= chuteT4i

!mols dos componentes nos produtos:
n_CO2= ((x(2)*coefCO2*M_CO2)/(coefH2Oreagentes*M_H2O)) / M_CO2
n_H2O= ((x(2)*coefH2Oprodutos*M_H2O)/(coefH2Oreagentes*M_H2O)) / M_H2O
n_ar= ((x(2)*coefAR*28.965d0)/(coefH2Oreagentes*M_H2O)) / 28.965d0
n_N2= ((x(2)*coefN2*M_N2)/(coefH2Oreagentes*M_H2O)) / M_N2
n_total = n_CO2 + n_H2O + n_ar + n_N2

m_total = (n_CO2*M_CO2) + (n_h2o*M_H2O) + (n_ar*28.965d0) + (n_N2*M_N2)

!fração molar dos componentes nos produtos:
y_CO2= n_CO2 / n_total
y_H2O= n_H2O / n_total
y_ar= n_ar / n_total
y_N2= n_N2 / n_total

s3_molar =( (y_CO2*sCO2(T3,CO2Prop)) + (y_H2O*sH2O(T3, IGH2OProp)) +
(y_ar*28.965d0*sAir(T3,Air,Col3)) + (y_N2*sN2(T3,N2Prop)) )
s4i_molar=( (y_CO2*sCO2(T4i,CO2Prop)) + (y_H2O*sH2O(T4i, IGH2OProp)) +
(y_ar*28.965d0*sAir(T4i,Air,Col3)) + (y_N2*sN2(T4i,N2Prop)) )

!Para misturas, deltaS não é zero:
P4 = (x(1)*P1)/(DEXP((s3_molar - s4i_molar)/8.314d0))

```



```

!TURBINA DE POTÊNCIA*****
s4_molar=( (y_CO2*sCO2(T4,CO2Prop)) + (y_H2O*sH2O(T4,IGH2OProp)) +
(y_ar*28.965d0*sAir(T4,Air,Col3)) + (y_N2*sN2(T4,N2Prop)) )

s5i_molar= s4_molar - (8.314d0 * DLOG(P4/P5))

chuteT5i=T4
s5i_chute=1.d20

do while (dabs(s5i_chute-s5i_molar)/dabs(s5i_molar).gt.1d-1)
  chuteT5i= chuteT5i - 1.d-1
  s5i_chute=( (y_CO2*sCO2(chuteT5i,CO2Prop)) + (y_H2O*sH2O(chuteT5i,
IGH2OProp)) + (y_ar*28.965d0*sAir(chuteT5i,Air,Col3)) + (y_N2*sN2(chuteT5i,N2Prop)) )
  continue
end do
chuteT5i= chuteT5i + 1.d-1

do while (dabs(s5i_chute-s5i_molar)/dabs(s5i_molar).gt.1d-2)
  chuteT5i= chuteT5i - 1.d-2
  s5i_chute=( (y_CO2*sCO2(chuteT5i,CO2Prop)) + (y_H2O*sH2O(chuteT5i,
IGH2OProp)) + (y_ar*28.965d0*sAir(chuteT5i,Air,Col3)) + (y_N2*sN2(chuteT5i,N2Prop)) )
  continue
end do
chuteT5i= chuteT5i + 1.d-2

do while (dabs(s5i_chute-s5i_molar)/dabs(s5i_molar).gt.1d-3)
  chuteT5i= chuteT5i - 1.d-3
  s5i_chute=( (y_CO2*sCO2(chuteT5i,CO2Prop)) + (y_H2O*sH2O(chuteT5i,
IGH2OProp)) + (y_ar*28.965d0*sAir(chuteT5i,Air,Col3)) + (y_N2*sN2(chuteT5i,N2Prop)) )
  continue
end do
chuteT5i= chuteT5i + 1.d-3

do while (dabs(s5i_chute-s5i_molar)/dabs(s5i_molar).gt.1d-4)
  chuteT5i= chuteT5i - 1.1d-4
  s5i_chute=( (y_CO2*sCO2(chuteT5i,CO2Prop)) + (y_H2O*sH2O(chuteT5i,
IGH2OProp)) + (y_ar*28.965d0*sAir(chuteT5i,Air,Col3)) + (y_N2*sN2(chuteT5i,N2Prop)) )
  continue
end do
chuteT5i= chuteT5i + 1.d-4

do while (dabs(s5i_chute-s5i_molar)/dabs(s5i_molar).gt.1d-5)
  chuteT5i= chuteT5i - 1.d-5
  s5i_chute=( (y_CO2*sCO2(chuteT5i,CO2Prop)) + (y_H2O*sH2O(chuteT5i,
IGH2OProp)) + (y_ar*28.965d0*sAir(chuteT5i,Air,Col3)) + (y_N2*sN2(chuteT5i,N2Prop)) )
  continue
end do
chuteT5i= chuteT5i + 1.d-5

do while (dabs(s5i_chute-s5i_molar)/dabs(s5i_molar).gt.1d-6)
  chuteT5i= chuteT5i - 1.d-6
  s5i_chute=( (y_CO2*sCO2(chuteT5i,CO2Prop)) + (y_H2O*sH2O(chuteT5i,
IGH2OProp)) + (y_ar*28.965d0*sAir(chuteT5i,Air,Col3)) + (y_N2*sN2(chuteT5i,N2Prop)) )
  continue
end do
chuteT5i= chuteT5i + 1.d-6

do while (dabs(s5i_chute-s5i_molar)/dabs(s5i_molar).gt.1d-7)

```

```

chuteT5i= chuteT5i - 1.d-7
s5i_chute=( (y_CO2*sCO2(chuteT5i,CO2Prop)) + (y_H2O*sH2O(chuteT5i,
IGH2OProp)) + (y_ar*28.965d0*sAir(chuteT5i,Air,Col3)) + (y_N2*sN2(chuteT5i,N2Prop)) )
continue
end do
chuteT5i= chuteT5i + 1.d-7

do while (dabs(s5i_chute-s5i_molar)/dabs(s5i_molar).gt.1d-8)
chuteT5i= chuteT5i - 1.d-8
s5i_chute=( (y_CO2*sCO2(chuteT5i,CO2Prop)) + (y_H2O*sH2O(chuteT5i,
IGH2OProp)) + (y_ar*28.965d0*sAir(chuteT5i,Air,Col3)) + (y_N2*sN2(chuteT5i,N2Prop)) )
continue
end do
chuteT5i= chuteT5i + 1.d-8

do while (dabs(s5i_chute-s5i_molar)/dabs(s5i_molar).gt.1d-9)
chuteT5i= chuteT5i - 1.d-9
s5i_chute=( (y_CO2*sCO2(chuteT5i,CO2Prop)) + (y_H2O*sH2O(chuteT5i,
IGH2OProp)) + (y_ar*28.965d0*sAir(chuteT5i,Air,Col3)) + (y_N2*sN2(chuteT5i,N2Prop)) )
continue
end do
chuteT5i= chuteT5i + 1.d-9

do while (dabs(s5i_chute-s5i_molar)/dabs(s5i_molar).gt.1d-10)
chuteT5i= chuteT5i - 1.d-10
s5i_chute=( (y_CO2*sCO2(chuteT5i,CO2Prop)) + (y_H2O*sH2O(chuteT5i,
IGH2OProp)) + (y_ar*28.965d0*sAir(chuteT5i,Air,Col3)) + (y_N2*sN2(chuteT5i,N2Prop)) )
continue
end do
chuteT5i= chuteT5i + 1.d-10

do while (dabs(s5i_chute-s5i_molar)/dabs(s5i_molar).gt.1d-11)
chuteT5i= chuteT5i - 1.d-11
s5i_chute=( (y_CO2*sCO2(chuteT5i,CO2Prop)) + (y_H2O*sH2O(chuteT5i,
IGH2OProp)) + (y_ar*28.965d0*sAir(chuteT5i,Air,Col3)) + (y_N2*sN2(chuteT5i,N2Prop)) )
continue
end do
chuteT5i= chuteT5i + 1.d-11

do while (dabs(s5i_chute-s5i_molar)/dabs(s5i_molar).gt.1d-12)
chuteT5i= chuteT5i - 1.d-12
s5i_chute=( (y_CO2*sCO2(chuteT5i,CO2Prop)) + (y_H2O*sH2O(chuteT5i,
IGH2OProp)) + (y_ar*28.965d0*sAir(chuteT5i,Air,Col3)) + (y_N2*sN2(chuteT5i,N2Prop)) )
continue
end do

T5i= chuteT5i

h5i=( (coefCO2*hCO2(chuteT5i, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT5i,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT5i,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT5i, N2Prop)) )

WTPideal_molar= h4 - h5i ! KJ/Kmol de combustivel
WTPideal = (WTPideal_molar/M_combustivel)*F_Areal ! KJ/Kg de ar
POT_TPideal = WTPideal * txm

POT_TPreal = ntp * POT_TPideal

```

!QH [KJ/Kg ar] :

!QH= F_Areal*PClcombustivel

QH_ponto= txm * F_Areal * PClcombustivel

!**** Ponto 5 real *****

WTPreal_molar= WTPideal_molar * ntp

h5= h4 - WTPreal_molar

chuteT5=T4

h5_chute=-100.d0

do while (dabs(h5_chute-h5)/dabs(h5).gt.1d-1)

chuteT5= chuteT5 - 1.d-1

h5_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT5, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT5, IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT5,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT5, N2Prop))

end do

chuteT5= chuteT5 + 1.d-1

do while (dabs(h5_chute-h5)/dabs(h5).gt.1d-2)

chuteT5= chuteT5 - 1.d-2

h5_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT5, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT5, IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT5,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT5, N2Prop))

end do

chuteT5= chuteT5 + 1.d-2

do while (dabs(h5_chute-h5)/dabs(h5).gt.1d-3)

chuteT5= chuteT5 - 1.d-3

h5_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT5, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT5, IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT5,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT5, N2Prop))

end do

chuteT5= chuteT5 + 1.d-3

do while (dabs(h5_chute-h5)/dabs(h5).gt.1d-4)

chuteT5= chuteT5 - 1.d-4

h5_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT5, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT5, IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT5,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT5, N2Prop))

end do

chuteT5= chuteT5 + 1.d-4

do while (dabs(h5_chute-h5)/dabs(h5).gt.1d-5)

chuteT5= chuteT5 - 1.d-5

h5_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT5, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT5, IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT5,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT5, N2Prop))

end do

chuteT5= chuteT5 + 1.d-5

do while (dabs(h5_chute-h5)/dabs(h5).gt.1d-6)

chuteT5= chuteT5 - 1.d-6

h5_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT5, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT5, IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT5,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT5, N2Prop))

end do

chuteT5= chuteT5 + 1.d-6

do while (dabs(h5_chute-h5)/dabs(h5).gt.1d-7)

chuteT5= chuteT5 - 1.d-7

h5_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT5, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT5, IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT5,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT5, N2Prop))

end do

```

chuteT5= chuteT5 + 1.d-7

do while (dabs(h5_chute-h5)/dabs(h5).gt.1d-8)
  chuteT5= chuteT5 - 1.d-8
  h5_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT5, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT5,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT5,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT5, N2Prop))
end do
chuteT5= chuteT5 + 1.d-8

do while (dabs(h5_chute-h5)/dabs(h5).gt.1d-9)
  chuteT5= chuteT5 - 1.d-9
  h5_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT5, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT5,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT5,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT5, N2Prop))
end do
chuteT5= chuteT5 + 1.d-9

do while (dabs(h5_chute-h5)/dabs(h5).gt.1d-10)
  chuteT5= chuteT5 - 1.d-10
  h5_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT5, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT5,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT5,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT5, N2Prop))
end do
chuteT5= chuteT5 + 1.d-10

do while (dabs(h5_chute-h5)/dabs(h5).gt.1d-11)
  chuteT5= chuteT5 - 1.d-11
  h5_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT5, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT5,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT5,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT5, N2Prop))
end do
chuteT5= chuteT5 + 1.d-11

do while (dabs(h5_chute-h5)/dabs(h5).gt.1d-12)
  chuteT5= chuteT5 - 1.d-12
  h5_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT5, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT5,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT5,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT5, N2Prop))
end do

T5= chuteT5

```

!CONTINUAÇÃO DO REGENERADOR *****

```

rendimento_regenerador=1.d0
!mtotal( h5-h6) = magua(ha'-ha)
h6= h5 - ((x(2)/m_total)*(ha_linha - ha))

chuteT6=T5
h6_chute=0.d0
do while (dabs(h6_chute-h6)/dabs(h6).gt.1d-1)
  chuteT6= chuteT6 - 1.d-1
  h6_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT6, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT6,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT6,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT6, N2Prop))
end do
chuteT6= chuteT6 + 1.d-1

do while (dabs(h6_chute-h6)/dabs(h6).gt.1d-2)
  chuteT6= chuteT6 - 1.d-2
  h6_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT6, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT6,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT6,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT6, N2Prop))
end do

```

```

end do
chuteT6= chuteT6 + 1.d-2

do while (dabs(h6_chute-h6)/dabs(h6).gt.1d-3)
  chuteT6= chuteT6 - 1.d-3
  h6_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT6, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT6,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT6,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT6, N2Prop))
end do
chuteT6= chuteT6 + 1.d-3

do while (dabs(h6_chute-h6)/dabs(h6).gt.1d-4)
  chuteT6= chuteT6 - 1.d-4
  h6_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT6, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT6,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT6,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT6, N2Prop))
end do
chuteT6= chuteT6 + 1.d-4

do while (dabs(h6_chute-h6)/dabs(h6).gt.1d-5)
  chuteT6= chuteT6 - 1.d-5
  h6_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT6, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT6,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT6,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT6, N2Prop))
end do
chuteT6= chuteT6 + 1.d-5

do while (dabs(h6_chute-h6)/dabs(h6).gt.1d-6)
  chuteT6= chuteT6 - 1.d-6
  h6_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT6, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT6,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT6,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT6, N2Prop))
end do
chuteT6= chuteT6 + 1.d-6

do while (dabs(h6_chute-h6)/dabs(h6).gt.1d-7)
  chuteT6= chuteT6 - 1.d-7
  h6_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT6, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT6,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT6,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT6, N2Prop))
end do
chuteT6= chuteT6 + 1.d-7

do while (dabs(h6_chute-h6)/dabs(h6).gt.1d-8)
  chuteT6= chuteT6 - 1.d-8
  h6_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT6, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT6,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT6,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT6, N2Prop))
end do
chuteT6= chuteT6 + 1.d-8

do while (dabs(h6_chute-h6)/dabs(h6).gt.1d-9)
  chuteT6= chuteT6 - 1.d-9
  h6_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT6, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT6,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT6,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT6, N2Prop))
end do
chuteT6= chuteT6 + 1.d-9

do while (dabs(h6_chute-h6)/dabs(h6).gt.1d-10)
  chuteT6= chuteT6 - 1.d-10
  h6_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT6, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT6,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT6,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT6, N2Prop))
end do
chuteT6= chuteT6 + 1.d-10

do while (dabs(h6_chute-h6)/dabs(h6).gt.1d-11)

```

```

    chuteT6= chuteT6 - 1.d-11
    h6_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT6, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT6,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT6,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT6, N2Prop))
end do
    chuteT6= chuteT6 + 1.d-11

do while (dabs(h6_chute-h6)/dabs(h6).gt.1d-12)
    chuteT6= chuteT6 - 1.d-12
    h6_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT6, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT6,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT6,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT6, N2Prop))
end do

T6= chuteT6

if (T6.lt.303.15d0) then ! T6 não pode ser menor que Tambiente para haver trocaa térmica
correta
    write(*,*)"Mude os dados de entrada, pois T6 não pode ser menor que Tambiente para haver
trocar térmica no sentido desejado"
    read(*,*)
    stop
end if

!RENDIMENTO*****

    nth = -(POT_TPreal - POTbomba_real)/QH_ponto

!FOBJ*****

    fobj = -(POT_TPreal - POTbomba_real)/(txm * 1.005d0 * T1)
    !fobj=nth

    continue

    return
end subroutine rendimento

```

- 2) Programação em fortran para otimização da eficiência com injeção de vapor saturado seco na câmara de combustão:

```
program otimizacao
implicit none
real(8) x(2),g(2),gold(2),d(2),dold(2),nth, nthold, xtmp2(2), &
    alfa, eps, epsmin, epsold, &
    Tcombustivel,T1,P1,P2,T3,P3,P5,Tw,Pw,txMw,txm,i,P_EntradaNaBomba,nb,nc,nt,ntp,
    POT_TPreal,fobj,fobjold,A_Freal,excesso_de_ar,alfa0
integer C, H, n, k, kmax,COMBUSTIVEL,fil,fil1

n=2

alfa=0.1d0
alfa0=alfa
epsmin=epsilon(0.d0)
eps=1.d0
epsold = 1.d50
fobjold=1.d200
fobj=1.d100

k=0
nthold=1.d50

open(unit=25,file="output2.dat",status="unknown") !define o arquivo de saida

write(*,*)"entre com T3"
read(*,*)T3

txm = 0.45d0; Tcombustivel=298.d0;T1=288.d0;P1=101.3d0;P3=811.d0;P5=101.3d0;

P2=P3
x(1)=P2/P1

write(*,*)"entre com a % de agua"
read(*,*)i
Tw=653.d0;Pw=1378.2d0;P_EntradaNaBomba=100.d0;nb=0.87d0;

txm=0.45d0

txMw = (i/100)*txm

x(2) = txMw

nc=0.87d0;nt=0.89d0;ntp=0.89d0;

write(*,*)"entre com as quantidades de atomos de C e H que seu combustivel tem"
read(*,*)C,H

COMBUSTIVEL=C+H
```

```

do while((k.lt.1000.d0).and.(x(1).gt.8.d0).and.(x(1).lt.50.d0))

    k=k+1

    call gradiente_dif_fin(T1, P1, T3, P3, P5, C,
                          H,Tcombustivel,COMBUSTIVEL,txm,txMw,Tw,Pw,P_EntradaNaBomb
                          a,nb,k,n,x,nc,nt,ntp,gold,d,dold,fobj,fobjold,A_Freal,excesso_de_ar)
    xtmp2=x
5      x=x+alfa*d

    if(x(2).gt.(0.05d0*txm))then
        x(2)=0.05d0*txm
    end if
    if(x(2).le.(0.d0))then
        x(2)=epsilon(0.d0)
    end if

    if(nc.gt.1.d0)then
        nc=1.d0 !restricao fisica (rendimento nao pode ser maior que 100%)
    end if
    if(nt.gt.1.d0)then
        nt=1.d0 !restricao fisica (rendimento nao pode ser maior que 100%)
    end if
    if(ntp.gt.1.d0)then
        ntp=1.d0 !restricao fisica (rendimento nao pode ser maior que 100%)
    end if

    call rendimento(T1, P1, T3, P3, P5, C, H, &
Tcombustivel,COMBUSTIVEL,txm,txMw,Tw,Pw,P_EntradaNaBomba,nb,k,n,x,nc,nt,ntp,POT_T
Preal,nth,fobj,fobjold,A_Freal,excesso_de_ar)

    if(fobj.lt.fobjold)then
        alfa=alfa*1.5d0
        fobjold = fobj
    else
        call erro(n,g,eps,epsold)
        if((eps.le.epsmin).or.(dabs(fobj-fobjold).le.epsmin)) then
            write(*,*) "Programa convergiu"
            read(*,*)
            stop
        end if

        alfa=alfa/1.5d0
        x=xtmp2
        goto 5
    end if

    write(25,19)k,x(1),x(2),POT_TPreal,A_Freal,excesso_de_ar,-nth, -fobj
    write(*,19)k,x(1),x(2),POT_TPreal,A_Freal,excesso_de_ar,-nth, -fobj
19  format(i4,1x,7(f19.12,1x))

```



```

end do
close(25)
end program otimizacao

```

```

!*****
!*****

```

```

subroutine erro(n,g,eps,epsold)
implicit none
integer n
real(8) eps,epsold,g(2)
epsold=eps
eps=dsqrt(g(1)*g(1)+g(2)*g(2))

```

```

end subroutine erro

```

```

!*****
!*****

```

```

subroutine gradiente_dif_fin(T1, P1, T3, P3, P5, C,
                             H,Tcombustivel,COMBUSTIVEL,txm,txMw,Tw,Pw,P_EntradaNaBo
                             mba,nb,k,n,x,nc,nt,ntp,g,gold,d,dold,fobj,fobjold,A_Freal,excesso_
                             de_ar)

```

```

implicit none
integer n,k,C, H,COMBUSTIVEL
real(8)
x(n),g(2),gold(2),d(2),dold(2),xtemp(n),nthtemp1,nthtemp2,nthtemp3,nthtemp4,deltax,deltay,delt
az,deltaw,xtemp_antes(4),gamak,&
nth,T1,
P1,T3,P3,P5,Tcombustivel,txm,txMw,Tw,Pw,P_EntradaNaBomba,nb,nc,nt,ntp,POT_TPreal,fobj
,fobjtemp1,fobjtemp2,fobjold,A_Freal,excesso_de_ar

```

```

deltax=1.d-5
deltay=1.d-5

```

```

call rendimento(T1, P1, T3, P3, P5, C, H, &
                 Tcombustivel,COMBUSTIVEL,txm,txMw,Tw,Pw,P_EntradaNaBomba,nb,k,n,x,
                 nc,nt,ntp,POT_TPreal,nth,fobj,fobjold,A_Freal,excesso_de_ar)

```

```

xtemp(1)=x(1)+deltax
xtemp(2)=x(2)
call rendimento(T1, P1, T3, P3, P5, C, H, &
                 Tcombustivel,COMBUSTIVEL,txm,txMw,Tw,Pw,P_EntradaNaBomba,nb,k,n,xt
                 emp,nc,nt,ntp,POT_TPreal,nth,fobjtemp1,fobjold,A_Freal,excesso_de_ar)

```

```

gold(1)=g(1)
g(1)=(fobjtemp1-fobj)/(deltax)

```

```

xtemp(2)=x(2)+deltay
xtemp(1)=x(1)
call rendimento(T1, P1, T3, P3, P5, C, H, &
                 Tcombustivel,COMBUSTIVEL,txm,txMw,Tw,Pw,P_EntradaNaBomba,nb,k,n,xt
                 emp,nc,nt,ntp,POT_TPreal,nth,fobjtemp2,fobjold,A_Freal,excesso_de_ar)

```

```

gold(2)=g(2)
g(2)=0.d0

```

```

if (k==1) then

```

```

    gamak = 0.d0
    d(1)= -g(1)
    d(2)= -g(2)
    else
    dold(1:2)=d(1:2)
    gamak = ( ( (g(1)*g(1)) + (g(2)*g(2)) ) / ( (gold(1)*gold(1)) + (gold(2)*gold(2)) ) )
    d(1)= -g(1) + (gamak*dold(1))
    d(2)= -g(2) + (gamak*dold(2))
    continue
end if

end subroutine gradiente_dif_fin

!*****
!*****

subroutine rendimento(T1, P1, T3, P3, P5, C, H, &
    Tcombustivel, COMBUSTIVEL, txm, txMw, Tw, Pw, P_EntradaNaBomba, nb,
    k, n, x, nc, nt, ntp, POT_TPreal, nth, fobj, fobjold, A_Freal, excesso_de_ar)

use ThermCoeffProp
use Thermo_Prop_Calc
implicit none
integer n, k, C, H, Col1, Col2_1, Col2_2, Col3, COMBUSTIVEL
real(8) x(n), nth, QH, h1, h2, h2i, h3, h4, h4i, h5i, Pr1, Pr2, Pr3, Pr4, Pr4i, Pr5i, T1, P1, T2, T2i, T3,
T4, T4i, P3, P4, P5, T5i, Tcombustivel, WCideal, WTideal, WCreai, WTreal, WTreal_molar,
WTPideal_molar, WTPideal, WTPreal, Wliq, hARreagentes, h_O2reagentes, &
hN2reagentes, h_CO2, hH2Oreagentes, hH2Oprodutos,
hARprodutos, hN2produtos, M_combustivel, M_H2O, M_CO2, M_O2, M_N2, M_C, M_H,
Air(5,489), IGH2OProp(6,46), CO2Prop(6,46), O2Prop(6,46),
N2Prop(6,46), comb(3,6), coefCO2, coefO2, coefN2, txm, txMw, Tw, Pw,
coefH2Oprodutos, coefH2Oreagentes, coefAR, A_Fest, A_Freal, F_Areal, excesso_de_ar,
PClcombustivel, hcombustivel, SFC, HR, POT, den, num, y_ar, y_H2O, y_CO2,
y_N2, chuteT4, h4_chute, chuteT4i, h4i_chute, s3_molar, s4i_molar, &
s4_molar, s5i_molar, s5i_chute, chuteT5i, POT_TPideal, POT_TPreal, QH_ponto, coefcombustivel,
POTbomba_ideal, POTbomba_real, nb, densidadeH2O, WTreal_combustivel
, WTreal_combustivel_molar, WTideal_combustivel, WTideal_combustivel_molar, P_EntradaNaBomba,
h6_chute, n_total, n_CO2, n_H2O, n_ar, n_N2, h2oCLSH(4,105), H2OSatTE(12,375),
H2OSatPE(12,272), Pb, Tb, hb, sb, Pa, ha, chuteT6, chuteh6, T6, h6,
h5_antes, rendimento_regenerador, rendimento_regeneradorDepois, Ta_sat, ha_VapSat,
ha_linha, WTPreal_molar, nc, nt, ntp, m_mistura, m_total, Ta_linha,
T5, chuteT5, h5_chute, h5, fobj, fobjold, AUX

M_H2O=18.d0
M_O2=32.d0
M_N2=28.d0
M_H=1.d0
M_C=12.d0
M_CO2=M_C + M_O2
M_combustivel=(C*M_C)+(H*M_H)

!BOMBA:*****
! T=30C, P=101,3KPa => Líquido Comprimido

Pb=101.3d0

call Sat_H2O_TE_Prop(H2OSatTE)
call Sat_H2O_PE_Prop(H2OSatPE)

```

```

call h2oCLSH_prop(Pb,h2oCLSH)

Tb= 30.d0 + 273.15d0

hb=( hH2OCL(Tb,h2oCLSH) * M_H2O ) - 285830.d0 !KJ/Kmmol (nist -> bathie)
sb= sH2OCL(Tb,h2oCLSH) !KJ/KgK

Pa=Pw !Pw=1378.2d0

call h2oCLSH_prop(Pa,h2oCLSH)

ha= ( hsH2OCL(sb,h2oCLSH)* M_H2O ) - 285830.d0 !KJ/Kmol (nist -> bathie)

sb= (sH2OCL(Tb,h2oCLSH) * M_H2O )+ (69.95d0) !KJ/KmolK (nist -> bathie)

POTbomba_real= x(2)*(ha-hb) / 18.d0

!REGENERADOR ( 1a parte )*****

Ta_linha=TH2OSat(Pa,H2OSatPE) !k

ha_linha=( hgH2OSat(Ta_linha,H2OSatTE) * M_H2O ) - 285830.d0 !KJ/Kmol (nist -> bathie)

!COMPRESSOR*****
call Air_Prop(Air)

Col1=1
h1=hAir(T1,Air,Col1)
Pr1=PrAir(T1,Air,Col1)

Pr2=Pr1*x(1)
Col2_1=5
T2i= TAir(Pr2,Air,Col2_1)
h2i=hAir(Pr2,Air,Col2_1)!2i ideal

WCideal= h2i-h1
WCreal=WCideal/nc

h2= WCreal + h1 !2 real
col2_2=3
T2=TAir(h2,Air,Col2_2)

if (T2.gt.T3) then
write(*,*)"T2 nao pode ser maior que T3"
read(*,*)
stop
end if

!CÂMARA DE COMBUSTÃO *****
call N2_Prop(N2Prop)
call CO2_Prop(CO2Prop)
call O2_prop(O2Prop)
call IdealH2O_Prop(IGH2OProp)

!COMBUSTIVEL = tipo formula entalpia de formacao PCI
!
!          5 (CH4) -74.809d0 50012.d0
!          8 (C2H6) -84.685d0 44521.d0
!          11 (C3H8) -103.849d0 46351.d0

```

!	14	(C4H10)	-147.655d0	45342.d0
!	19	(C7H12)	-224.392d0	44555.d0
!	26	(C8H18)	-249.957d0	44422.d0
!				

```

if (COMBUSTIVEL == 5) then
  hcombustivel = -74.809d0
  PCIcombustivel= 50012.d0
  else if (COMBUSTIVEL == 8) then
    hcombustivel = -84.685d0
    PCIcombustivel = 44521.d0
    else if (COMBUSTIVEL == 11) then
      hcombustivel = -103.849d0
      PCIcombustivel = 46351.d0
      else if (COMBUSTIVEL == 14) then
        hcombustivel = -147.655d0
        PCIcombustivel = 45342.d0
        else if (COMBUSTIVEL == 19) then
          hcombustivel = -224.392d0
          PCIcombustivel= 44555.d0
          else if (COMBUSTIVEL == 26) then
            hcombustivel = -249.957d0
            PCIcombustivel = 44422.d0
            else if (COMBUSTIVEL == 44) then
              hcombustivel = -403.d0
              PCIcombustivel = 42791.d0
end if

```

!entalpia molar dos reagentes:

```

hcombustivel = hcombustivel * 1000.d0
hARreagentes= hAir(T2,Air,Col1)
h_O2reagentes= hO2(T2, O2Prop)
hN2reagentes= hN2(T2, N2Prop)
hH2Oreagentes = ha_linha

```

!entalpia molar dos produtos:

```

h_CO2= hCO2(T3, CO2Prop)
hH2Oprodutos= hH2O(T3, IGH2OProp)
hARprodutos= hAir(T3,Air,Col1)
hN2produtos= hN2(T3, N2Prop)

```

```

coefcombustivel=1.d0
coefCO2=C
coefO2=((2.d0*C) + (H/2.d0))/2.d0
coefN2=3.72d0*coefO2

```

!*****

!Hr=Hp:

$$AUX = (-(M_{O2} + (3.72d0 * M_{N2})) * coefO2 * (txMw/txm)) - ((M_{H2O}/2.d0) * H)) / (txMw/txm)$$

$$den = (coefCO2 * h_{CO2}) + (AUX * (hARprodutos - hARreagentes)) + (coefN2 * hN2produtos) - (coefcombustivel * hcombustivel) + (coefO2 * H_{O2reagentes}) + (coefN2 * hN2reagentes) - ((H/2.d0) * hH2Oreagentes)$$

$$num = ((M_{H2O}/(txMw/txm)) * (hARreagentes - hARprodutos)) + (hH2Oreagentes - hH2Oprodutos)$$

```
coefH2Oprodutos=den/num
|*****
```

```
coefH2Oreagentes= coefH2Oprodutos -(H/2.d0)
```

```
coefAR=( AUX + (M_H2O*coefH2Oprodutos/(txMw/txm)) )/28.965d0
```

```
A_Fest= ((coefO2*M_O2)+(coefN2*M_N2))/((C*M_C)+(H*M_H))
```

```
A_Freal= ((coefO2*M_O2)+(coefN2*M_N2)+( coefAR*28.965d0))/((C*M_C)+(H*M_H))
```

```
excesso_de_ar= ( ((A_Freal - A_Fest)/ A_Fest) * 100.d0 ) !%
```

```
F_Areal= 1.d0/(A_Freal)
```

```
PCIcombustivel= PCIcombustivel
```

```
!TURBINA*****
```

```
h3 =( (coefCO2*h_CO2) + (coefH2Oprodutos*hH2Oprodutos) +
(coefAR*28.965d0*hARprodutos) + (coefN2*hN2produtos) )
```

```
WTreal = WCreai
```

```
WTreal_combustivel = WTreal*A_Freal ! KJ/Kg de combustivel
```

```
WTreal_combustivel_molar = WTreal_combustivel*M_combustivel !KJ/Kmol de combustivel
```

```
h4 = h3 - WTreal_combustivel_molar
```

```
Col3=1
```

```
chuteT4=T3
```

```
h4_chute=0.d0
```

```
do while (dabs(h4_chute-h4)/dabs(h4).gt.1d-1)
```

```
chuteT4= chuteT4 - 1.d-1
```

```
h4_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4, N2Prop))
```

```
end do
```

```
chuteT4= chuteT4 + 1.d-1
```

```
do while (dabs(h4_chute-h4)/dabs(h4).gt.1d-2)
```

```
chuteT4= chuteT4 - 1.d-2
```

```
h4_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4, N2Prop))
```

```
end do
```

```
chuteT4= chuteT4 + 1.d-2
```

```
do while (dabs(h4_chute-h4)/dabs(h4).gt.1d-3)
```

```
chuteT4= chuteT4 - 1.d-3
```

```
h4_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4, N2Prop))
```

```
end do
```

```
chuteT4= chuteT4 + 1.d-3
```

```
do while (dabs(h4_chute-h4)/dabs(h4).gt.1d-4)
```

```
chuteT4= chuteT4 - 1.d-4
```

```
h4_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4,
```

```

IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4, N2Prop))
end do
chuteT4= chuteT4 + 1.d-4

do while (dabs(h4_chute-h4)/dabs(h4).gt.1d-5)
  chuteT4= chuteT4 - 1.d-5
  h4_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4, N2Prop))
end do
chuteT4= chuteT4 + 1.d-5

do while (dabs(h4_chute-h4)/dabs(h4).gt.1d-6)
  chuteT4= chuteT4 - 1.d-6
  h4_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4, N2Prop))
end do
chuteT4= chuteT4 + 1.d-6

do while (dabs(h4_chute-h4)/dabs(h4).gt.1d-7)
  chuteT4= chuteT4 - 1.d-7
  h4_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4, N2Prop))
end do
chuteT4= chuteT4 + 1.d-7

do while (dabs(h4_chute-h4)/dabs(h4).gt.1d-8)
  chuteT4= chuteT4 - 1.d-8
  h4_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4, N2Prop))
end do
chuteT4= chuteT4 + 1.d-8

do while (dabs(h4_chute-h4)/dabs(h4).gt.1d-9)
  chuteT4= chuteT4 - 1.d-9
  h4_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4, N2Prop))
end do
chuteT4= chuteT4 + 1.d-9

do while (dabs(h4_chute-h4)/dabs(h4).gt.1d-10)
  chuteT4= chuteT4 - 1.d-10
  h4_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4, N2Prop))
end do
chuteT4= chuteT4 + 1.d-10

do while (dabs(h4_chute-h4)/dabs(h4).gt.1d-11)
  chuteT4= chuteT4 - 1.d-11
  h4_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4, N2Prop))
end do
chuteT4= chuteT4 + 1.d-11

do while (dabs(h4_chute-h4)/dabs(h4).gt.1d-12)
  chuteT4= chuteT4 - 1.d-12
  h4_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4, N2Prop))
end do

```

T4= chuteT4

WTideal= WTreal/nt

WTideal_combustivel = WTideal*A_Freal ! KJ/Kg de combustivel

WTideal_combustivel_molar = WTideal_combustivel*M_combustivel !KJ/Kmol de combustivel

h4i = h3 - WTideal_combustivel_molar

chuteT4i=T3

h4i_chute=0.d0

do while (dabs(h4i_chute-h4i)/dabs(h4i).gt.1d-1)

chuteT4i= chuteT4i - 1.d-1

h4i_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4i, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4i, IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4i,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4i, N2Prop))

end do

chuteT4i= chuteT4i + 1.d-1

do while (dabs(h4i_chute-h4i)/dabs(h4i).gt.1d-2)

chuteT4i= chuteT4i - 1.d-2

h4i_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4i, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4i, IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4i,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4i, N2Prop))

end do

chuteT4i= chuteT4i + 1.d-2

do while (dabs(h4i_chute-h4i)/dabs(h4i).gt.1d-3)

chuteT4i= chuteT4i - 1.d-3

h4i_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4i, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4i, IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4i,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4i, N2Prop))

end do

chuteT4i= chuteT4i + 1.d-3

do while (dabs(h4i_chute-h4i)/dabs(h4i).gt.1d-4)

chuteT4i= chuteT4i - 1.d-4

h4i_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4i, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4i, IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4i,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4i, N2Prop))

end do

chuteT4i= chuteT4i + 1.d-4

do while (dabs(h4i_chute-h4i)/dabs(h4i).gt.1d-5)

chuteT4i= chuteT4i - 1.d-5

h4i_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4i, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4i, IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4i,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4i, N2Prop))

end do

chuteT4i= chuteT4i + 1.d-5

do while (dabs(h4i_chute-h4i)/dabs(h4i).gt.1d-6)

chuteT4i= chuteT4i - 1.d-6

h4i_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4i, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4i, IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4i,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4i, N2Prop))

end do

chuteT4i= chuteT4i + 1.d-6

do while (dabs(h4i_chute-h4i)/dabs(h4i).gt.1d-7)

chuteT4i= chuteT4i - 1.d-7

h4i_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4i, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4i, IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4i,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4i, N2Prop))

```

end do
  chuteT4i= chuteT4i + 1.d-7

do while (dabs(h4i_chute-h4i)/dabs(h4i).gt.1d-8)
  chuteT4i= chuteT4i - 1.d-8
  h4i_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4i, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4i,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4i,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4i, N2Prop))
end do
  chuteT4i= chuteT4i + 1.d-8

do while (dabs(h4i_chute-h4i)/dabs(h4i).gt.1d-9)
  chuteT4i= chuteT4i - 1.d-9
  h4i_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4i, CO2Prop)) +
(coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4i, IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4i,Air,Col3))
+ (coefN2*hN2(chuteT4i, N2Prop))
end do
  chuteT4i= chuteT4i + 1.d-9

do while (dabs(h4i_chute-h4i)/dabs(h4i).gt.1d-10)
  chuteT4i= chuteT4i - 1.d-10
  h4i_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4i, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4i,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4i,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4i, N2Prop))
end do
  chuteT4i= chuteT4i + 1.d-10

do while (dabs(h4i_chute-h4i)/dabs(h4i).gt.1d-11)
  chuteT4i= chuteT4i - 1.d-11
  h4i_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4i, CO2Prop)) +
(coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4i, IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4i,Air,Col3))
+ (coefN2*hN2(chuteT4i, N2Prop))
end do
  chuteT4i= chuteT4i + 1.d-11

do while (dabs(h4i_chute-h4i)/dabs(h4i).gt.1d-12)
  chuteT4i= chuteT4i - 1.d-12
  h4i_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT4i, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT4i,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT4i,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT4i, N2Prop))
end do

T4i= chuteT4i

```

!mols dos componentes nos produtos:

```

n_CO2= ((x(2)*coefCO2*M_CO2)/(coefH2Oreagentes*M_H2O)) / M_CO2
n_H2O= ((x(2)*coefH2Oprodutos*M_H2O)/(coefH2Oreagentes*M_H2O)) / M_H2O
n_ar= ((x(2)*coefAR*28.965d0)/(coefH2Oreagentes*M_H2O)) / 28.965d0
n_N2= ((x(2)*coefN2*M_N2)/(coefH2Oreagentes*M_H2O)) / M_N2
n_total = n_CO2 + n_H2O + n_ar + n_N2

```

```

m_total = (n_CO2*M_CO2) + (n_h2o*M_H2O) + (n_ar*28.965d0) + (n_N2*M_N2)

```

!fração molar dos componentes nos produtos:

```

y_CO2= n_CO2 / n_total
y_H2O= n_H2O / n_total
y_ar= n_ar / n_total
y_N2= n_N2 / n_total

```



```

s3_molar=( (y_CO2*sCO2(T3,CO2Prop)) + (y_H2O*sH2O(T3,IGH2OProp)) +
(y_ar*28.965d0*sAir(T3,Air,Col3)) + (y_N2*sN2(T3,N2Prop)) )
s4i_molar=( (y_CO2*sCO2(T4i,CO2Prop)) + (y_H2O*sH2O(T4i,IGH2OProp)) +
(y_ar*28.965d0*sAir(T4i,Air,Col3)) + (y_N2*sN2(T4i,N2Prop)) )

```

!Para misturas, deltaS não é zero:

```

P4 = (x(1)*P1)/(DEXP((s3_molar - s4i_molar)/8.314d0))

```

!TURBINA DE POTÊNCIA*****

```

s4_molar=( (y_CO2*sCO2(T4,CO2Prop)) + (y_H2O*sH2O(T4,IGH2OProp)) +
(y_ar*28.965d0*sAir(T4,Air,Col3)) + (y_N2*sN2(T4,N2Prop)) )

```

```

s5i_molar= s4_molar - (8.314d0 * DLOG(P4/P5))

```

```

chuteT5i=T4

```

```

s5i_chute=1.d20

```

```

do while (dabs(s5i_chute-s5i_molar)/dabs(s5i_molar).gt.1d-1)
  chuteT5i= chuteT5i - 1.d-1
  s5i_chute=( (y_CO2*sCO2(chuteT5i,CO2Prop)) + (y_H2O*sH2O(chuteT5i,
IGH2OProp)) + (y_ar*28.965d0*sAir(chuteT5i,Air,Col3)) + (y_N2*sN2(chuteT5i,N2Prop)) )
  continue
end do
chuteT5i= chuteT5i + 1.d-1

```

```

do while (dabs(s5i_chute-s5i_molar)/dabs(s5i_molar).gt.1d-2)
  chuteT5i= chuteT5i - 1.d-2
  s5i_chute=( (y_CO2*sCO2(chuteT5i,CO2Prop)) + (y_H2O*sH2O(chuteT5i,
IGH2OProp)) + (y_ar*28.965d0*sAir(chuteT5i,Air,Col3)) + (y_N2*sN2(chuteT5i,N2Prop)) )
  continue
end do
chuteT5i= chuteT5i + 1.d-2

```

```

do while (dabs(s5i_chute-s5i_molar)/dabs(s5i_molar).gt.1d-3)
  chuteT5i= chuteT5i - 1.d-3
  s5i_chute=( (y_CO2*sCO2(chuteT5i,CO2Prop)) + (y_H2O*sH2O(chuteT5i,
IGH2OProp)) + (y_ar*28.965d0*sAir(chuteT5i,Air,Col3)) + (y_N2*sN2(chuteT5i,N2Prop)) )
  continue
end do
chuteT5i= chuteT5i + 1.d-3

```

```

do while (dabs(s5i_chute-s5i_molar)/dabs(s5i_molar).gt.1d-4)
  chuteT5i= chuteT5i - 1.1d-4
  s5i_chute=( (y_CO2*sCO2(chuteT5i,CO2Prop)) + (y_H2O*sH2O(chuteT5i,
IGH2OProp)) + (y_ar*28.965d0*sAir(chuteT5i,Air,Col3)) + (y_N2*sN2(chuteT5i,N2Prop)) )
  continue
end do
chuteT5i= chuteT5i + 1.d-4

```

```

do while (dabs(s5i_chute-s5i_molar)/dabs(s5i_molar).gt.1d-5)
  chuteT5i= chuteT5i - 1.d-5
  s5i_chute=( (y_CO2*sCO2(chuteT5i,CO2Prop)) + (y_H2O*sH2O(chuteT5i,
IGH2OProp)) + (y_ar*28.965d0*sAir(chuteT5i,Air,Col3)) + (y_N2*sN2(chuteT5i,N2Prop)) )
  continue
end do
chuteT5i= chuteT5i + 1.d-5

```

```

do while (dabs(s5i_chute-s5i_molar)/dabs(s5i_molar).gt.1d-6)
  chuteT5i= chuteT5i - 1.d-6

```

```

        s5i_chute=( (y_CO2*sCO2(chuteT5i,CO2Prop)) + (y_H2O*sH2O(chuteT5i,
IGH2OProp)) + (y_ar*28.965d0*sAir(chuteT5i,Air,Col3)) + (y_N2*sN2(chuteT5i,N2Prop)) )
        continue
    end do
    chuteT5i= chuteT5i + 1.d-6

    do while (dabs(s5i_chute-s5i_molar)/dabs(s5i_molar).gt.1d-7)
        chuteT5i= chuteT5i - 1.d-7
        s5i_chute=( (y_CO2*sCO2(chuteT5i,CO2Prop)) + (y_H2O*sH2O(chuteT5i,
IGH2OProp)) + (y_ar*28.965d0*sAir(chuteT5i,Air,Col3)) + (y_N2*sN2(chuteT5i,N2Prop)) )
        continue
    end do
    chuteT5i= chuteT5i + 1.d-7

    do while (dabs(s5i_chute-s5i_molar)/dabs(s5i_molar).gt.1d-8)
        chuteT5i= chuteT5i - 1.d-8
        s5i_chute=( (y_CO2*sCO2(chuteT5i,CO2Prop)) + (y_H2O*sH2O(chuteT5i,
IGH2OProp)) + (y_ar*28.965d0*sAir(chuteT5i,Air,Col3)) + (y_N2*sN2(chuteT5i,N2Prop)) )
        continue
    end do
    chuteT5i= chuteT5i + 1.d-8

    do while (dabs(s5i_chute-s5i_molar)/dabs(s5i_molar).gt.1d-9)
        chuteT5i= chuteT5i - 1.d-9
        s5i_chute=( (y_CO2*sCO2(chuteT5i,CO2Prop)) + (y_H2O*sH2O(chuteT5i,
IGH2OProp)) + (y_ar*28.965d0*sAir(chuteT5i,Air,Col3)) + (y_N2*sN2(chuteT5i,N2Prop)) )
        continue
    end do
    chuteT5i= chuteT5i + 1.d-9

    do while (dabs(s5i_chute-s5i_molar)/dabs(s5i_molar).gt.1d-10)
        chuteT5i= chuteT5i - 1.d-10
        s5i_chute=( (y_CO2*sCO2(chuteT5i,CO2Prop)) + (y_H2O*sH2O(chuteT5i,
IGH2OProp)) + (y_ar*28.965d0*sAir(chuteT5i,Air,Col3)) + (y_N2*sN2(chuteT5i,N2Prop)) )
        continue
    end do
    chuteT5i= chuteT5i + 1.d-10

    do while (dabs(s5i_chute-s5i_molar)/dabs(s5i_molar).gt.1d-11)
        chuteT5i= chuteT5i - 1.d-11
        s5i_chute=( (y_CO2*sCO2(chuteT5i,CO2Prop)) + (y_H2O*sH2O(chuteT5i,
IGH2OProp)) + (y_ar*28.965d0*sAir(chuteT5i,Air,Col3)) + (y_N2*sN2(chuteT5i,N2Prop)) )
        continue
    end do
    chuteT5i= chuteT5i + 1.d-11

    do while (dabs(s5i_chute-s5i_molar)/dabs(s5i_molar).gt.1d-12)
        chuteT5i= chuteT5i - 1.d-12
        s5i_chute=( (y_CO2*sCO2(chuteT5i,CO2Prop)) + (y_H2O*sH2O(chuteT5i,
IGH2OProp)) + (y_ar*28.965d0*sAir(chuteT5i,Air,Col3)) + (y_N2*sN2(chuteT5i,N2Prop)) )
        continue
    end do

T5i= chuteT5i

h5i =( (coefCO2*hCO2(chuteT5i, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT5i,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT5i,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT5i, N2Prop)) )

```

```

WTPideal_molar= h4 - h5i ! KJ/Kmol de combustivel
WTPideal = (WTPideal_molar/M_combustivel)*F_Areal ! KJ/Kg de ar
POT_TPideal = WTPideal * txm

```

```

POT_TPreal = ntp * POT_TPideal

```

```

!QH [KJ/Kg ar] :
!QH= F_Areal*PCIcombustivel

```

```

QH_ponto= txm * F_Areal * PCIcombustivel

```

```

!**** Ponto 5 real *****

```

```

WTPreal_molar= WTPideal_molar * ntp

```

```

h5= h4 - WTPreal_molar

```

```

chuteT5=T4
h5_chute=-100.d0

```

```

do while (dabs(h5_chute-h5)/dabs(h5).gt.1d-1)
  chuteT5= chuteT5 - 1.d-1
  h5_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT5, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT5,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT5,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT5, N2Prop))
end do
chuteT5= chuteT5 + 1.d-1

```

```

do while (dabs(h5_chute-h5)/dabs(h5).gt.1d-2)
  chuteT5= chuteT5 - 1.d-2
  h5_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT5, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT5,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT5,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT5, N2Prop))
end do
chuteT5= chuteT5 + 1.d-2

```

```

do while (dabs(h5_chute-h5)/dabs(h5).gt.1d-3)
  chuteT5= chuteT5 - 1.d-3
  h5_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT5, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT5,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT5,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT5, N2Prop))
end do
chuteT5= chuteT5 + 1.d-3

```

```

do while (dabs(h5_chute-h5)/dabs(h5).gt.1d-4)
  chuteT5= chuteT5 - 1.d-4
  h5_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT5, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT5,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT5,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT5, N2Prop))
end do
chuteT5= chuteT5 + 1.d-4

```

```

do while (dabs(h5_chute-h5)/dabs(h5).gt.1d-5)
  chuteT5= chuteT5 - 1.d-5
  h5_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT5, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT5,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT5,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT5, N2Prop))
end do
chuteT5= chuteT5 + 1.d-5

```

```

do while (dabs(h5_chute-h5)/dabs(h5).gt.1d-6)
  chuteT5= chuteT5 - 1.d-6
  h5_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT5, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT5,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT5,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT5, N2Prop))
end do

```

```

chuteT5= chuteT5 + 1.d-6

do while (dabs(h5_chute-h5)/dabs(h5).gt.1d-7)
  chuteT5= chuteT5 - 1.d-7
  h5_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT5, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT5,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT5,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT5, N2Prop))
end do
chuteT5= chuteT5 + 1.d-7

do while (dabs(h5_chute-h5)/dabs(h5).gt.1d-8)
  chuteT5= chuteT5 - 1.d-8
  h5_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT5, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT5,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT5,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT5, N2Prop))
end do
chuteT5= chuteT5 + 1.d-8

do while (dabs(h5_chute-h5)/dabs(h5).gt.1d-9)
  chuteT5= chuteT5 - 1.d-9
  h5_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT5, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT5,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT5,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT5, N2Prop))
end do
chuteT5= chuteT5 + 1.d-9

do while (dabs(h5_chute-h5)/dabs(h5).gt.1d-10)
  chuteT5= chuteT5 - 1.d-10
  h5_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT5, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT5,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT5,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT5, N2Prop))
end do
chuteT5= chuteT5 + 1.d-10

do while (dabs(h5_chute-h5)/dabs(h5).gt.1d-11)
  chuteT5= chuteT5 - 1.d-11
  h5_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT5, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT5,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT5,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT5, N2Prop))
end do
chuteT5= chuteT5 + 1.d-11

do while (dabs(h5_chute-h5)/dabs(h5).gt.1d-12)
  chuteT5= chuteT5 - 1.d-12
  h5_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT5, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT5,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT5,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT5, N2Prop))
end do

T5= chuteT5

```

!CONTINUAÇÃO DO REGENERADOR *****

```

rendimento_regenerador=1.d0
!mtotal( h5-h6) = magua(ha'-ha)
h6= h5 - ((x(2)/m_total)*(ha_linha - ha))

chuteT6=T5
h6_chute=0.d0
do while (dabs(h6_chute-h6)/dabs(h6).gt.1d-1)
  chuteT6= chuteT6 - 1.d-1
  h6_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT6, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT6,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT6,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT6, N2Prop))
end do

```

```

end do
chuteT6= chuteT6 + 1.d-1

do while (dabs(h6_chute-h6)/dabs(h6).gt.1d-2)
  chuteT6= chuteT6 - 1.d-2
  h6_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT6, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT6,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT6,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT6, N2Prop))
end do
chuteT6= chuteT6 + 1.d-2

do while (dabs(h6_chute-h6)/dabs(h6).gt.1d-3)
  chuteT6= chuteT6 - 1.d-3
  h6_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT6, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT6,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT6,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT6, N2Prop))
end do
chuteT6= chuteT6 + 1.d-3

do while (dabs(h6_chute-h6)/dabs(h6).gt.1d-4)
  chuteT6= chuteT6 - 1.d-4
  h6_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT6, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT6,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT6,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT6, N2Prop))
end do
chuteT6= chuteT6 + 1.d-4

do while (dabs(h6_chute-h6)/dabs(h6).gt.1d-5)
  chuteT6= chuteT6 - 1.d-5
  h6_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT6, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT6,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT6,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT6, N2Prop))
end do
chuteT6= chuteT6 + 1.d-5

do while (dabs(h6_chute-h6)/dabs(h6).gt.1d-6)
  chuteT6= chuteT6 - 1.d-6
  h6_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT6, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT6,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT6,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT6, N2Prop))
end do
chuteT6= chuteT6 + 1.d-6

do while (dabs(h6_chute-h6)/dabs(h6).gt.1d-7)
  chuteT6= chuteT6 - 1.d-7
  h6_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT6, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT6,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT6,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT6, N2Prop))
end do
chuteT6= chuteT6 + 1.d-7

do while (dabs(h6_chute-h6)/dabs(h6).gt.1d-8)
  chuteT6= chuteT6 - 1.d-8
  h6_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT6, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT6,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT6,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT6, N2Prop))
end do
chuteT6= chuteT6 + 1.d-8

do while (dabs(h6_chute-h6)/dabs(h6).gt.1d-9)
  chuteT6= chuteT6 - 1.d-9
  h6_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT6, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT6,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT6,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT6, N2Prop))
end do
chuteT6= chuteT6 + 1.d-9

do while (dabs(h6_chute-h6)/dabs(h6).gt.1d-10)

```

```

    chuteT6= chuteT6 - 1.d-10
    h6_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT6, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT6,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT6,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT6, N2Prop))
end do
    chuteT6= chuteT6 + 1.d-10

do while (dabs(h6_chute-h6)/dabs(h6).gt.1d-11)
    chuteT6= chuteT6 - 1.d-11
    h6_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT6, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT6,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT6,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT6, N2Prop))
end do
    chuteT6= chuteT6 + 1.d-11

do while (dabs(h6_chute-h6)/dabs(h6).gt.1d-12)
    chuteT6= chuteT6 - 1.d-12
    h6_chute = (coefCO2*hCO2(chuteT6, CO2Prop)) + (coefH2Oprodutos*hH2O(chuteT6,
IGH2OProp)) + (coefAR*28.965d0*hAir(chuteT6,Air,Col3)) + (coefN2*hN2(chuteT6, N2Prop))
end do

T6= chuteT6

if (T6.lt.303.15d0) then ! T6 não pode ser menor que Tambiente para haver trocar térmica
direito.
    write(*,*)"Mude os dados de entrada, pois T6 não pode ser menor que Tambiente para haver
trocar térmica no sentido desejado"
    read(*,*)
    stop
end if

!RENDIMENTO*****

    nth = -(POT_TPreal - POTbomba_real)/QH_ponto

!FOBJ*****

    !fobj = -(POT_TPreal - POTbomba_real)/(txm * 1.005d0 * T1)
    fobj=nth

    continue

    return
end subroutine rendimento

```